



**Universidade de
Aveiro
2009**

Departamento de Engenharia Mecânica

**TIAGO REBELO
NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA
INJECCÃO DE TERMOENDURECÍVEIS COM
REFORÇO**



**Universidade de
Aveiro
2009**

Departamento de Engenharia Mecânica

**TIAGO REBELO
NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA
INJEÇÃO DE TERMOENDURECÍVEIS COM
REFORÇO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria.

Dedico este trabalho à minha namorada Elisabete e aos meus pais Luís e Hermínia pelo incansável apoio.

o júri

presidente

Prof. Dr. Robertt Angelo Fontes Valente
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor auxiliar da Universidade de Coimbra

Prof. Dr. Francisco José Queirós de Melo
Professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Carlos Alexandre Bento Capela
Professor adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

agradecimentos

Aos professores Francisco José Malheiro Queirós de Melo e Carlos Alexandre Bento Capela pela orientação, pelo incansável apoio e dedicação que tiveram para comigo ao longo deste trabalho.

Ao Eng. Artur Mateus do CDRsp, pelo apoio para concretizar o trabalho proposto.

Ao Eng. Marco Santos, do Departamento de Electrónica pela ajuda no desenvolvimento do controlo do equipamento.

Ao Rui Santo e Nuno Santo da RMC pelo sabedoria transmitida e apoio no desenvolvimento do equipamento

Ao Mestre Pedro Sinogas e à Tekever pelo tempo concedido na elaboração deste trabalho.

Este trabalho foi possível graças ao apoio de:

CDRsp – Centro de Desenvolvimento Rápido e sustentado do Produto.

IPL – Instituto Politécnico de Leiria

RMC ENGRENAGENS

palavras-chave

Extrusão reactiva, twin screw, termoendurecíveis, cargas, equipamento laboratorial, extrusora

resumo

Actualmente, a integração de cargas orgânicas e ou inorgânicas, em compósitos de matriz termoendurecível, são um tema em investigação, quer pela necessidade de seguirem políticas de sustentabilidade, quer pela possibilidade da obtenção de materiais compósitos com características específicas. Isto cria novos desafios no que respeita ao processamento destes compostos. É sobre este tipo de tecnologias que este trabalho se debruça. Uma abordagem de processamento diferente é estudada, projectada, colocada em funcionamento e testada. O uso de uma extrusora de duplo fuso engrenado em co-rotação é usado como reactor de polimerização, extrusão reactiva, onde também se dá a mistura das cargas em fracções volúmicas elevadas. A caracterização do equipamento é tida em conta antes de processar compostos de poliuretano com cargas orgânicas, cortiça e pó de pinho e cargas inorgânicas, termoplástico proveniente da reciclagem doméstica. Amostras destes compostos são analisados ao nível das densidades, homogeneidades e suas características mecânicas. Conclui-se que o equipamento se revela eficaz, na mistura e promoção de polimerização homogénea, portanto uma mais-valia como processo disponível para este tipo de compostos. No entanto, a maquinação dos fusos deverá ser revista dado que algum material fica preso na superfície do seu canal.

.

keywords

Reactive extrusion, twin screw, thermoset, fillers, laboratorial machine, extruder.

abstract

Currently, the integration of inorganic or organic fillers in thermosetting matrix composites, is a subject under investigation, whether the need to pursue sustainable policies, and also the possibility of obtaining composite materials with specific characteristics. This creates new challenges regarding the processing of these compounds. It's about of this type of technology that this work focuses. A different approach to processing is studied, design, put into operation and tested. The employ of a twin self wiping screw extruder is used as a polymerization reactor, reactive extrusion, where also is mixed the fillers in high volume fractions. The characterization of the equipment is taken into account before processing of polyurethane compounds with organic fillers, cork pine powder and inorganic fillers, thermoplastic from domestic recycling. Samples of these compounds are analyzed in terms of density, homogeneities and their mechanical properties. It is concluded that the equipment is effective in promoting mixing and homogeneous polymerization, thus, more valuable as a process available for this type of compounds. Although machining of the screws should be reviewed because some material is stick on the surface of their channel.

Índice

Índice.....	i
Lista de Figuras	ii
Lista de Tabelas.....	v
Lista de Siglas	vi
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Introdução.....	2
1.2 Objectivos e estrutura da tese	3
Capítulo 2 Materiais e Técnicas de Processamento de Termoendurecíveis com e sem cargas	5
2.1 Introdução.....	6
2.2 Materiais Poliméricos	6
2.3 Termoplásticos.....	11
2.4 Materiais Termoendurecíveis	12
2.5 Cargas	14
2.6 Processos comerciais de processamento	15
2.6.1 Cabeças de mistura	25
2.7 Extrusão reactiva	31
2.8 Extrusora	34
Capítulo 3 Desenvolvimento e Fabrico do Equipamento MixFill	41
3.1 Introdução.....	42
3.2 Motivações e Requisitos.....	42
3.3 Sistema Mixfill	46
3.4 Extrusora MixFill.....	49
3.5 Sistema de bombagem dos dois componentes poliméricos	59
3.6 Sistema de controlo da extrusora MixFill	63
Capítulo 4 Resultados Experimentais.....	67
4.1 Introdução.....	68
4.2 Avaliação do desempenho da extrusora MixFill	68
4.3 Materiais processados e caracterização	74
Capítulo 5 Conclusões e trabalhos futuros	81
5.1 Conclusões	82
5.2 Trabalhos Futuros	82
Referências.....	84

Lista de Figuras

Figura 1 Homopolímero e copolímero (QMCWEB).....	7
Figura 2 Polímero de estrutura linear (ex: PEAD) (QMCWEB).....	8
Figura 3 Polímero de estrutura ramificada (Ex: PEBD) (QMCWEB).....	8
Figura 4 Polímero de estrutura em rede (Ex: Resina fenol formaldeído) (QMCWEB).....	9
Figura 5 Representação da estrutura de um polímero amorfo (Sant’anna 2007).....	9
Figura 6 Representação da estrutura de um polímero semi-cristalino com domínios cristalinos e amorfos (Sant’anna 2007).....	10
Figura 7 Equipamento manual de processamento de termoendurecíveis A (Rook Metering Equipment and Michael Engineering)	16
Figura 8 Exemplo de um equipamento manual de processamento de termoendurecíveis B (Rook Metering Equipment and Michael Engineering)	16
Figura 9 NovaFlex-multifill (Hennecke Polyurethane Technology 2002).....	17
Figura 10 Slabstock (Hennecke Polyurethane Technology 2002)	17
Figura 11 Esquema de processo da NovaFlex-multifill (Hennecke Polyurethane Technology 2002)	18
Figura 12 Charging of dividing piston (Hennecke Polyurethane Technology 2006).....	19
Figura 13 Shot release (Hennecke Polyurethane Technology 2006)	19
Figura 14 Equipamento topline HK (Hennecke Polyurethane Technology 2002)	19
Figura 15 Princípio de funcionamento de misturas de cargas com polioli (Hennecke Polyurethane Technology 2008).....	21
Figura 16 Exemplo A, pulverização de PU com cargas da CSM (Hennecke Polyurethane Technology 2008)	22
Figura 17 Exemplo B, pulverização de PU com cargas da CSM (Hennecke Polyurethane Technology 2008)	22
Figura 18 Princípio de funcionamento do equipamento Rimdomat (Hennecke Polyurethane Technology)	24
Figura 19 Diagrama de processo de máquina de RIM (Hennecke Polyurethane Technology) ..	26
Figura 20 Princípio de funcionamento da cabeça de mistura MX (Hennecke Polyurethane Technology)	27
Figura 21 Princípio de funcionamento da cabeça de mistura ML (Hennecke Polyurethane Technology)	28
Figura 22 Exemplos de cabeça de mistura de baixa pressão (Cannon Polyurethane Technology)	29
Figura 23 Inclusão de terceiro jacto de material, cargas de poliuretano reciclado em pó (Cannon Polyurethane Technology)	29
Figura 24 Desenho CAD da VMAP (fonte: projecto VMAP).....	30

Figura 25 Desenho esquemático de uma extrusora (Ito et al 2004).....	35
Figura 26 Classificação das extrusoras pelo número de fusos (Kohlgruber 2008)	36
Figura 27 Corpo de um extrusora da ZSK, monobloco (esquerda) e bloco com inserto (direita) (Kohlgruber 2008)	37
Figura 28 Configurações de extrusoras: (a) fuso único, (b) co-misturadora, (c) modo de mistura sem engrenamento, (d) modo de transporte sem engrenamento, (e) contra-rotação engrenamento completo, (f) co-rotação engrenamento completo, (g) contra-rotação cónica e (h) auto-limpeza em co-rotação (Janssen 2007)	37
Figura 29 Secções de fuso, da esquerda para a direita, fuso com lobo único, fuso de duplo lobo e fuso de três lobos (Kohlgruber 2008).....	39
Figura 30 Material proveniente da reciclagem doméstica e industrial.....	43
Figura 31 Exemplo da aplicação de um pavimento com termoplástico reciclado (Extruplas 2009)	44
Figura 32 Metodologia para encontrar os requisitos do produto (Completo 2008)	45
Figura 33 Esboço do equipamento MixFill	47
Figura 34 Esquema do princípio de funcionamento da extrusora de duplo fuso MixFill	48
Figura 35 Desenho em CAD 3D da extrusora de duplo fuso desenvolvida (MixFill).....	48
Figura 36 Protótipo MixFill desenvolvido e fabricado para o processamento de materiais poliméricos com elevadas fracções volúmicas de cargas.	49
Figura 37 Evolução das características das extrusoras de duplo fuso engrenado da ZSK (Kohlgruber 2008)	50
Figura 38 Geometria da extrusora de duplo fuso com auto-limpeza (Janssen 2007).....	51
Figura 39 Construção da Geometria dos fusos de uma extrusora de duplo fuso em auto-limpeza (Janssen 2007)	52
Figura 40 Corpo e fusos da extrusora desenvolvida	53
Figura 41 Superfícies dos fusos com problemas de acabamento superficial	54
Figura 42 Fusos montados no corpo da extrusora, com chumaceiras e rolamentos axiais.	54
Figura 43 Distribuição do factor de segurança para a situação crítica considerada (bloqueio dos fusos com material solidificado).....	55
Figura 44 Distribuição de deslocamentos para a situação crítica considerada (bloqueio dos fusos com material solidificado).....	56
Figura 45 Pormenor do sistema de transmissão	56
Figura 46 Folha de cálculo para dimensionamento das engrenagens	57
Figura 47 Pormenores do sistema mecânico de processamento da extrusora MixFill.	58
Figura 48 Sistema mecânico do processamento da extrusora MixFill: componentes maquinados.	58
Figura 49 Imagem da aplicação do kit de vedantes em “viton”	60
Figura 50 Imagem do programa de dimensionamento das correias dentadas e de polias	61
Figura 51 Desenho do sistema de bombagem e sistema de armazenamento	61

Figura 52 Circuito do sistema de bombagem.....	62
Figura 53 Displays de controlo dos 3 VEV, colocados numa zona ergonómicamente correcta.	64
Figura 54 Esquema eléctrico da MixFill	65
Figura 55 Quadro eléctrico da extrusora MixFill	66
Figura 56 Folha de cálculo para as frequências dos VEV em função dos caudais pretendidos	69
Figura 57 Ensaios de variação da velocidade de rotação versus frequência.	70
Figura 58 Variação da velocidade de rotação versus frequência para o alimentador de cargas.	71
Figura 59 Variação da velocidade de rotação versus frequência para as bombas dos dois componentes do termoendurecível (A e B)	71
Figura 60 Resultado de um teste de caudal ao sistema de bombagem da MixFill	72
Figura 61 Alterações efectuadas ao alimentador de cargas (Esq. posição de trabalho; dir. posição de medição de caudal)	73
Figura 62 Material agarrado aos canais dos fusos e ao corpo da extrusora	74
Figura 63 Fotografias dos vários materiais processados na extrusora MixFill	76
Figura 64 Balança e dispositivo usado para calcular as densidades das amostras do material processado na MixFill	77
Figura 65 Equipamento de DMA	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 Características de equipamentos para extrusão.....	50
Tabela 2 Principais características da bomba GHP1-D-2.....	59
Tabela 3 Materiais processados na MixFill e caracterizados	75
Tabela 4 Densidades dos materiais processados na extrusora MixFill	77

Lista de Siglas

CAD – Computer aided design
CAM – Computer aided manufacturing
CFC – Clorofluorcarboneto
CNC – Comando Numérico Computorizado
CO₂ – Dióxido de Carbono
DMA – Dynamic Mechanical Analysis
ESTG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão
IPL – Instituto Politécnico de Leiria
L/D – Comprimento do fuso / Diâmetro do fuso
MEKP – Peróxido de metiletilcetona
PEAD – Polietileno de alta densidade
PEBD – Polietileno de baixa densidade
PID – Controlador proporcional integral derivativo
PU – Poliuretano
RIM – Reaction injection molding
T_g – Temperatura de transição vítrea
TIM – Termoplastic Injection Moulding
VEV – Variador Electrónico de Velocidade
VMAP – Versatile Moisture Adsorbing Polymers

Capítulo 1 **Introdução**

1.1 Introdução

No âmbito do mestrado integrado do Curso de Engenharia mecânica da Universidade de Aveiro, foi proposto um trabalho de investigação que tem como tema: “Desenvolvimento de equipamento para injeção de termoendurecíveis com reforço”.

Neste trabalho de investigação, pretende-se desenvolver e fabricar um equipamento para o processamento de novos materiais nomeadamente, materiais compósitos de matriz polimérica termoendurecível reforçados com cargas orgânicas e inorgânicas. É objectivo deste trabalho estudar, também o processamento de materiais poliméricos reciclados.

A selecção de qualquer tipo de material está intrinsecamente ligada às suas propriedades e ao seu modo de processamento. Assim, é de todo importante, na escolha de um determinado material conhecer o seu processo de produção.

Actualmente, a integração de cargas orgânicos e ou inorgânicas, em compósitos de matriz polimérica, são um tema em investigação, quer pela necessidade de seguirem políticas de sustentabilidade, quer também pela possibilidade da obtenção de materiais compósitos com características específicas.

O processamento destes materiais compósitos pode ser efectuado em máquinas de TIM (thermoplastic Injection Moulding), caso a matriz seja termoplástica, ou máquinas de RIM (Reaction Injection Moulding), caso a matriz seja uma resina termoendurecível. O processo baseado em RIM permite uma maior incorporação da carga devido à reduzida viscosidade dos reagentes poliméricos utilizados no processamento. Verifica-se também, que existe uma natural ligação entre o material a processar e o processo de processamento. Assim, com este trabalho pretende-se desenvolver um sistema de mistura e processamento de materiais compósitos de matriz polimérica, direccionado para cargas provenientes de polímeros reciclados. Ambiciona-se ainda, criar um sistema que tenha uma elevada flexibilidade para utilização laboratorial.

Pretende-se, também, validar o sistema de processamento, utilizando cargas de pinho, cortiça e termoplástico proveniente de reciclagem doméstica, numa mistura homogénea.

Alguns destes materiais processados serão caracterizados mecanicamente.

1.2 Objectivos e estrutura da tese

O objectivo central deste trabalho de investigação, consiste no desenvolvimento de um novo conceito de processamento de termoendurecíveis com cargas, utilizando o princípio da extrusão reactiva, que irá ser apresentado no capítulo 2, e utilizado na produção de materiais compósitos. Esta técnica irá permitir desenvolver novos materiais, compósitos com diferentes fracções volúmicas de cargas. Para tal, o sistema deverá processar materiais termoendurecíveis com cargas, tendo sempre em conta que se trata de um equipamento laboratorial para pesquisa, ou seja, o mais flexível possível para permitir o processamento de materiais com fracções volúmicas de fillers diferentes.

O trabalho de investigação realizado para a concretização deste objectivo incidiu, essencialmente, nas seguintes partes:

- Tecnologias existentes para o processamento de materiais termoendurecíveis com cargas;
- Concepção do sistema Mixill, selecção de componentes, projecto, fabrico e montagem;
- Caracterização de materiais processados utilizando o equipamento, de forma a avaliar o processo/equipamento desenvolvido.

Este trabalho de investigação será desenvolvido ao longo de cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema da tese de dissertação, onde são descritos os objectivos, assim como os principais materiais e equipamento em foco essenciais nesta investigação.

No capítulo 2 é desenvolvido um trabalho de pesquisa relativo às técnicas de processamento existentes de materiais termoendurecíveis com fillers. O objectivo deste capítulo é dar a conhecer as tecnologias existentes que podem ser utilizadas para processar materiais de matriz polimérica com fillers.

No capítulo seguinte, capítulo 3, são apresentados os equipamentos existentes relacionados com este trabalho, tecnologias de fabrico utilizadas na construção do equipamento, projecto mecânico, detalhes de construção, e são também justificadas as várias opções de construção consideradas.

No capítulo 4 são indicados os diferentes materiais processados com o equipamento MixFill. O material utilizado nos ensaios de avaliação do equipamento foi o poliuretano. As cargas utilizadas no processamento são partículas de material termoplástico proveniente de uma unidade de tratamento de resíduos e também partículas cortiça. São, também, descritas as técnicas de caracterização utilizadas.

Por último, no capítulo 5, são expostos e discutidos os resultados obtidos assim como se deixam em aberto oportunidades para eventuais trabalhos de investigação a realizar no futuro.

Capítulo 2 Materiais e Técnicas de Processamento de Termoendurecíveis com e sem cargas

2.1 Introdução

O sistema MixFill nasceu de um conjunto de princípios, que surgiram no decurso da investigação de soluções existentes para o processamento de termoendurecíveis com e sem cargas. Neste capítulo, irão ser expostos processamentos disponíveis para estes materiais, algumas soluções comerciais e outras de cariz académico.

No trabalho de pesquisa realizado, foram encontradas várias soluções com diferentes objectivos. No entanto, cada equipamento posteriormente descrito, comunga em pelo menos um requisito com o sistema aqui criado, a MixFill.

2.2 Materiais Poliméricos

Os materiais poliméricos são leves e resistentes, práticos e versáteis, duráveis e relativamente baratos. São uma constante do nosso dia, o que os torna muito importantes na sociedade actual. Muitos dos objectos utilizados no nosso dia-a-dia são, parcialmente ou na sua totalidade, de plástico. O desenvolvimento tecnológico, associado à crescente evolução no mundo da química orgânica, tem possibilitado um notável nível de procura, descoberta e utilização de materiais plásticos. De facto, as suas excelentes propriedades, versatilidade e diversas formas, possibilitam um vasto leque de aplicações, tornando-o num produto moderno, apetecível e cada vez mais importante. Sectores como os de utilidades domésticas, brinquedos e construção civil, até aos que empregam tecnologias mais sofisticadas, como os de saúde, informática, electrónicos, automóveis, militar e aviação, entre outros, têm vindo a ampliar a utilização desta matéria-prima nos seus produtos.

Um polímero é uma substância constituída por moléculas de grandes dimensões (macromoléculas), caracterizadas pela repetição de uma ou mais unidades de dimensões inferiores, ligadas entre si por ligações covalentes. As unidades repetitivas dos polímeros unem-se de modo a formar uma estrutura linear ou ramificada. As ramificações podem ainda interligar-se e formar uma rede tridimensional reticulada.

Os polímeros podem ser classificados em homopolímeros, se tiverem apenas um tipo de unidade repetitiva de monómeros da mesma natureza, ou copolímeros, se contiverem duas ou mais unidades repetitivas. Podem obter-se diferentes tipos de copolímeros em função da forma como as moléculas de monómeros se unem entre si. Assim, as unidades podem ser distribuídas aleatoriamente, alternadas, em blocos, ou ramificadas, permitindo que estas combinações, dêem origem a polímeros com diferentes propriedades baseados nas estruturas obtidas.

Na Figura 1 estão apresentadas formas esquemáticas de um homopolímero, de um copolímero aleatório, de um copolímero alternado e de um copolímero em bloco.

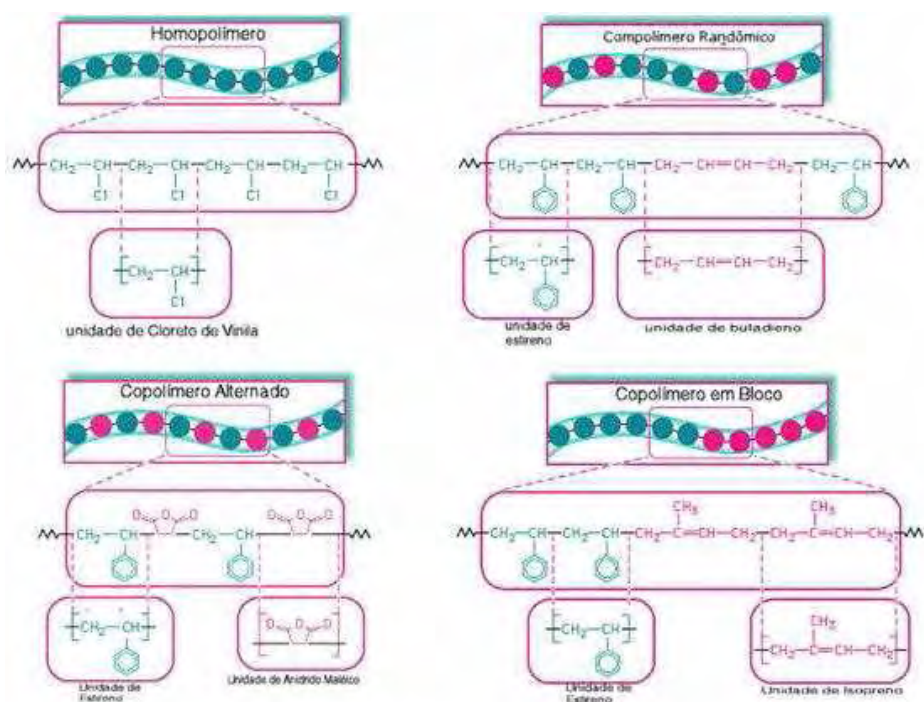


Figura 1 Homopolímero e copolímero (QMCWEB).

Em função da natureza química dos polímeros, e da técnica utilizada na polimerização, os polímeros podem exibir diferentes tipos de estruturas. Os mais comuns são os de estrutura linear, ramificada ou em rede. A Figura 2 ilustra o polietileno de alta densidade (PEAD), uma molécula de cadeia longa e linear, feita pela polimerização do etileno, um composto cuja fórmula estrutural é $\text{CH}_2=\text{CH}_2$.

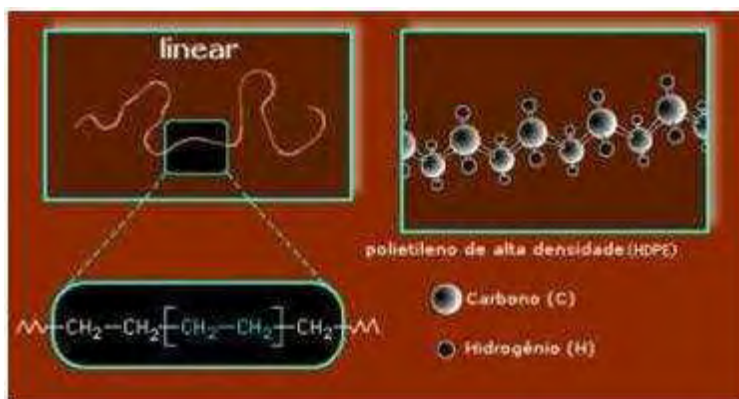


Figura 2 Polímero de estrutura linear (ex: PEAD) (QMCWEB).

Um outro tipo de estrutura que apresenta os polímeros é a ramificada. Na Figura 3 está apresentado o polietileno de baixa densidade (PEBD). O impedimento espacial provocado pelas ramificações dificulta um "empilhamento" das cadeias poliméricas. Por esta razão, as forças inter-moleculares que mantêm as cadeias poliméricas unidas, tendem a ser mais fracas em polímeros com estrutura ramificada. Por isso, o PEBD é bastante flexível e pode ser utilizado como filme plástico para embalagens, enquanto que o PEAD é bastante duro e resistente, sendo utilizado em garrafas, brinquedos, etc.



Figura 3 Polímero de estrutura ramificada (Ex: PEBD) (QMCWEB).

A Figura 4 mostra um polímero cujas cadeias estão entrelaçadas numa complexa rede de ligações covalentes. Esta figura representa a resina fenol formaldeído, onde moléculas de fenol são unidas pelo formaldeído, como refere QMCWEB.

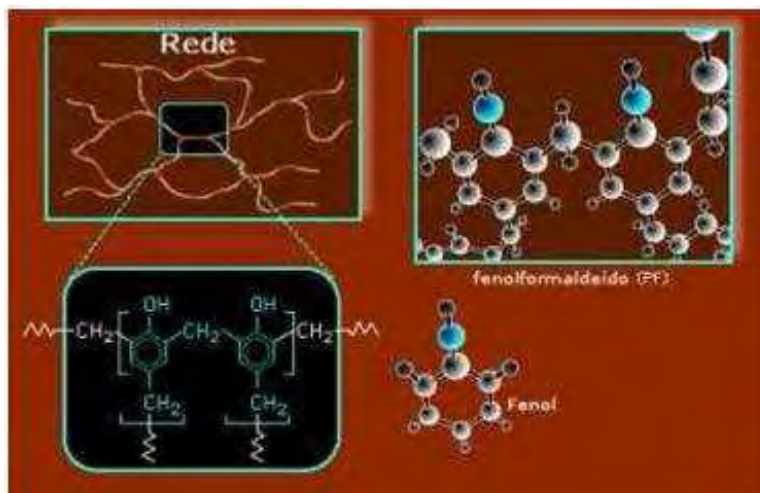


Figura 4 Polímero de estrutura em rede (Ex: Resina fenol formaldeído) (QMCWEB).

Uma forma de classificar os materiais poliméricos é pela sua estrutura, como sendo amorfos ou cristalinos. Os polímeros amorfos apresentam uma baixa ou nenhuma ordenação das cadeias poliméricas, como pode ser constatado na Figura 5.

Os polímeros amorfos não apresentam cristalinidade e portanto, não apresentam nenhum ponto de fusão cristalino, mas podem tornar-se num fluido suficientemente menos viscoso para que possa fluir e ser moldado. A temperatura em que isso começa a ocorrer é denominada por temperatura de transição vítrea, T_g .

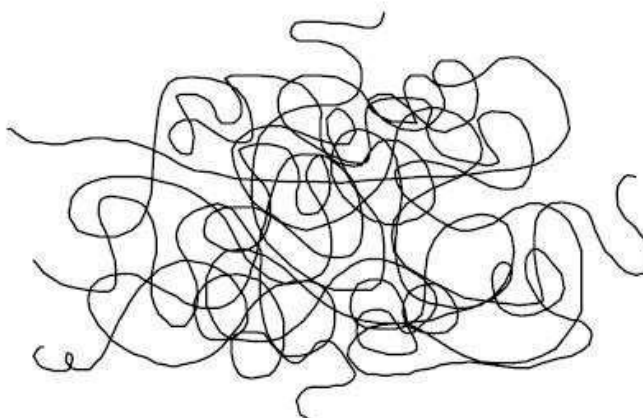


Figura 5 Representação da estrutura de um polímero amorfo (Sant'anna 2007).

Cada polímero possui uma temperatura de transição vítrea característica e quanto mais alta for, maior será a temperatura máxima de uso deste material, mantendo as suas propriedades mecânicas razoavelmente constantes. Acima da T_g , as moléculas começam

a mover-se e as propriedades do material modificam-se substancialmente. Já os polímeros cristalinos apresentam áreas onde há uma ordenação das cadeias poliméricas de modo a formarem estruturas regulares denominadas por cristais, como pode ser observado na Figura 6.



Figura 6 Representação da estrutura de um polímero semi-cristalino com domínios cristalinos e amorfos (Sant’anna 2007).

Segundo Lyman (1989) e Stevens (1990) , outra forma de classificar os polímeros é dividi-los em termoplásticos e termoendurecíveis, consoante a sua capacidade de fusão e solidificação repetidamente, sem perda significativa das suas propriedades fundamentais (polietilenos, polimetacrilato de metilo e policloreto de vinilo) ou, uma vez aquecidos, assumirem uma forma permanente (poliuretanos, resinas epoxy, poliéster, e fenolicas). Os termoplásticos são materiais capazes de passar por sucessivos ciclos de fusão-solidificação, sem sofrerem degradações severas das suas propriedades. Os elastómeros (poliisopreno e polibutadieno) são um outro tipo de polímeros, de origem natural ou sintética, com elevado grau de elasticidade, isto é, quando submetidos a uma tensão, deformam-se significativamente. Esta deformação é reversível, dado que o material retoma as suas dimensões originais ao ser removida a tensão.

2.3 Termoplásticos

De acordo com Davis et al. (1982), os termoplásticos são moléculas longas, com um comprimento entre de 20 a 30 mm. Estes polímeros podem ser repetidamente aquecidos, fabricados e, conseqüentemente, reciclados.

Os termoplásticos podem-se dividir em dois grandes grupos: termoplásticos de uso geral e termoplásticos de engenharia. Os termoplásticos de uso geral, cobrem a maioria dos plásticos utilizados actualmente, entre eles estão o polietileno, polipropileno e poliestireno que são materiais de baixo custo. As modestas propriedades mecânicas deste grupo podem ser melhoradas (por exemplo, por adição de cargas), tornando-os mais competitivos com outras classes de termoplásticos. Os termoplásticos de engenharia, oferecem uma combinação de propriedades interessantes, como alta resistência e módulo, tenacidade e/ou resistência ao desgaste, ao ataque químico e ao calor. São uma alternativa comum à utilização de peças metálicas, sendo os mais importantes desta categoria as poliamidas, poliacetais, policarbonatos, poliésteres termoplásticos e poli(óxido de fenileno) modificado.

Os termoplásticos, podem ser quimicamente obtidos por adição ou condensação. São plásticos que necessitam de calor para serem moldados (temperaturas demasiado elevadas podem causar degradação ou decomposição) e que mantêm estável a forma adquirida durante a moldação, assim que se dá o seu arrefecimento. Estes materiais podem, teoricamente, ser várias vezes reaquecidos e sofrerem um novo ciclo de moldação para obterem novas formas, sem que ocorra alteração significativa das suas propriedades. Contudo, na prática, deve haver o cuidado de definir um limite de reprocessamento destes materiais, já que a exagerada repetição deste processo pode levar à degradação.

A polimerização por adição dá-se com compostos insaturados, os quais contêm ligações duplas ou triplas, como refere Clark (1971). Essas ligações rompem-se e originam ligações simples, logo, a polimerização ocorre sem a formação de subprodutos. A polimerização por condensação, consiste na formação de uma macro molécula a partir de

monómeros e reagem entre si com a eliminação de água ou de outras pequenas moléculas que não participam de reacções posteriores.

2.4 Materiais Termoendurecíveis

As resinas termoendurecíveis, são compostos cujas cadeiras poliméricas estão unidas quimicamente através da reacção denominada de cura. A reacção da cura e características das resinas termoendurecíveis, diferenciam-se dos demais polímeros devido à formação de uma ligação rígida com interligações químicas que restringem a mobilidade molecular.

As cadeias poliméricas apresentam uma alta densidade de reticulações. As resinas, como comercialmente são conhecidos os termoendurecíveis, gozam de várias vantagens em relação aos termoplásticos: elevada temperatura de distorção térmica, boa resistência a solventes, módulo elevado, possibilitando a sua utilização em várias aplicações. Actualmente, o uso crescente e largamente difundido das resinas está relacionado, em grande parte, com as suas boas propriedades, tais como: baixa massa molecular, resistência química e ao calor, estabilidade dimensional e adaptabilidade aos métodos de processamento.

Os termoendurecíveis mais usados e económicos são os poliésteres, poliuretanos, viniléster e resinas fenólicas; os quais são usados principalmente para compor compósitos reforçados com fibras de vidro. As resinas epoxy são mais caras e além das aplicações estruturais, também são muito utilizadas em aplicações aeroespaciais por possuírem melhores propriedades mecânicas e melhor resistência à humidade do que os poliésteres, poliuretanos e resinas vinílicas. Em aplicações de altas temperaturas, são empregadas as resinas poliamidas, cujo seu limite superior de temperatura para utilização em regime contínuo é de aproximadamente 230°C.

A Cura das resinas termoendurecíveis é definida pela mudança irreversível nas propriedades químicas e físicas de uma determinada formulação resina/iniciador/promotor ocasionado por uma reacção química. O processo de cura é

altamente exotérmico, promovendo inicialmente uma queda da viscosidade do meio, devido ao aumento da temperatura interna da resina e em seguida, o aumento da viscosidade, devido ao aumento da massa molecular.

Um exemplo da cura de termoendurecíveis é a da resina Ester vinílica que ocorre através da polimerização radicalar entre grupos vinílicos reactivos e do monómero de estireno, resultando numa rede tridimensional pela ligação das moléculas. Os radicais livres são gerados pela decomposição de iniciadores, como por exemplo peróxido de metiletilcetona (MEKP). O aumento da decomposição dos iniciadores e o aumento da taxa de produção dos radicais livres pode ocorrer com a utilização de temperaturas elevadas ou com a utilização de promotores, como por exemplo cobalto bivalente. O iniciador é o elemento activo no processo enquanto o promotor apenas catalisa o processo de iniciação, pois este não exerce nenhum efeito na resina. A escolha das condições de cura baseia-se, principalmente, nas condições económicas e de processamento. É ainda importante ressaltar, que as condições de cura afectam o comportamento mecânico, sendo necessário conhecer os factores que interferem no processo de cura.

O processo de cura das resinas termoendurecíveis pode ser dividido em três etapas. A gelificação (gelttime), primeira etapa, é o período que vai desde a hora em que se mistura o catalisador até ao ponto em que a resina começa a ficar na forma de gel e se dá o aumento da temperatura. Geralmente em resinas poliéster, a temperatura máxima durante o processo de gel pode chegar aos 150°C. Esta temperatura limite denomina-se de pico exotérmico. Após o tempo de gel vem o tempo de endurecimento, segunda etapa, que corresponde ao período necessário para a resina obter uma parte significativa das suas propriedades mecânicas. A etapa final, corresponde ao tempo de maturação durante o qual o compósito desenvolve toda a sua estabilidade e dureza. O processo de maturação é a parte vital do ciclo de cura, o que pode levar dias ou talvez semanas, dependendo da temperatura na qual o compósito for mantido. Quando é preciso obter melhores propriedades, poderá ser necessário proporcionar ao conjunto final uma pós-cura com temperaturas mais elevadas. Em geral, quanto maior for a temperatura, menor

será o tempo necessário para se obterem as propriedades totais do compósito, como refere QMCWEB.

2.5 Cargas

Antequera refere que, a fabricação de componentes plásticos, os polímeros não são os únicos constituintes. Na maioria dos componentes plásticos são adicionados aditivos em concentrações variadas com diversas finalidades, alguns com enorme relevância, destinando-se fundamentalmente à melhoria das condições de processamento, propriedades e apresentação visual do componente. É necessário que os aditivos utilizados reúnam uma série de condições indispensáveis à sua correcta aplicação, em especial a neutralidade e a compatibilidade com a resina e resistência dos agentes químicos.

Os diversos aditivos classificam-se em categorias, de acordo com a sua função. Os aditivos usados com maior frequência são os corantes ou pigmentos, os lubrificantes, os estabilizantes, os antioxidantes, os plastificantes, os retardadores de chama, os agentes antiestáticos, os agentes de formação de espumas, reforços e cargas. Os lubrificantes externos são utilizados para o processo de desmoldagem entre o polímero e as zonas moldantes da ferramenta afim de evitar e/ou atenuar as consequências do contacto entre elas. No entanto, os lubrificantes internos são usados para aumentar a facilidade com que as moléculas do polímero deslizam umas sobre as outras. Os estabilizantes são aditivos utilizados para proteger o polímero da degradação provocada pela radiação, principalmente pela luz ultravioleta e pelo calor. Os retardadores de chama são aditivos incorporados nos plásticos com o objectivo de alterar o comportamento do plástico quando exposto à chama, impedindo a iniciação do fogo e a propagação da chama. Os agentes de formação de espumas têm como objectivo produzir um gás que actua como agente espumante. Os agentes anti-estáticos são aditivos que têm por finalidade impedir a criação ou armazenamento de electricidade estática na superfície das peças ou produtos plásticos. Os reforços são materiais de partículas ou fibras, adicionados aos

compostos de materiais poliméricos, com o intuito exclusivo de melhorar algumas das suas propriedades mecânicas, muitas vezes em detrimento dos custos dos mesmos. Exemplos de reforços que podem ser incorporados em compostos de materiais poliméricos são as fibras de vidro, que promovem o aumento da rigidez e resistência à tracção. As cargas são incorporadas nos materiais poliméricos basicamente com o intuito de redução de custo do material (por exemplo, serradura), sem induzir grandes alterações nas propriedades dos plásticos.

2.6 Processos comerciais de processamento

A Michael Engineering Limited, empresa que comercializa equipamentos de dosagem, distribuição e mistura de resinas epoxy, silicone, poliuretano e acrílicas, apresenta algumas soluções bastante simples.

Neste tópico são apresentadas duas soluções deste fabricante, essencialmente distintas quanto ao seu sistema de bombagem independente dos materiais constituintes do termoendurecível.

A solução mais simples, apresenta dois reservatórios para ambos os componentes do material termoendurecível que estão individualmente e directamente ligados a uma bomba de pistão accionada manualmente, como se pode observar na Figura 7. Comparando este processo com o de mistura manual num recipiente, o fabricante reclama mais limpeza no ambiente de trabalho e uma maior exactidão na dosagem dos componentes.

Segundo Rook Metering Equipment and Michael Engineering, as razões de mistura são facilmente alteradas ajustando o braço de cada bomba doseadora na alavanca.



Figura 7 Equipamento manual de processamento de termoendurecíveis A (Rook Metering Equipment and Michael Engineering)

Na Figura 8 pode ser visualizado um equipamento doseador de dois componentes com um misturador estático aplicado à saída do dispensador. Este tipo de solução é amplamente usado na área dos compósitos e prototipagem rápida.

O equipamento utiliza duas bombas de engrenagens para bombear um caudal de material de cada componente. Esta não necessita de mistura manual, geralmente responsável por criar bastante sujidade e é um sistema com pouca manutenção. Estas bombas de engrenagens estão acopladas, cada uma a um pinhão, e ligadas por uma corrente que pode ser movimentada manual ou electricamente.

Para alterar a razão de mistura, basta alterar a razão de transmissão.



Figura 8 Exemplo de um equipamento manual de processamento de termoendurecíveis B (Rook Metering Equipment and Michael Engineering)

Segundo Hennecke Polyurethane Technology (2002), a NovaFlex-MultiFill, Figura 9, lançada em 1995 pela Hennecke e Bayer, é uma tecnologia utilizada no processamento de materiais poliméricos com cargas, como por exemplo as melaminas ou carbonato de cálcio, utilizada na produção por lote ou na produção em linha. Este processo facilita a fabricação em bloco flexível de baixa densidade, Figura 10, sem ter que empregar os agentes de expansão de CFC ou cloreto de metileno uma vez que, o CO₂ dos recursos naturais é utilizado como seu substituto.



Figura 9 NovaFlex-multifill (Hennecke Polyurethane Technology 2002)

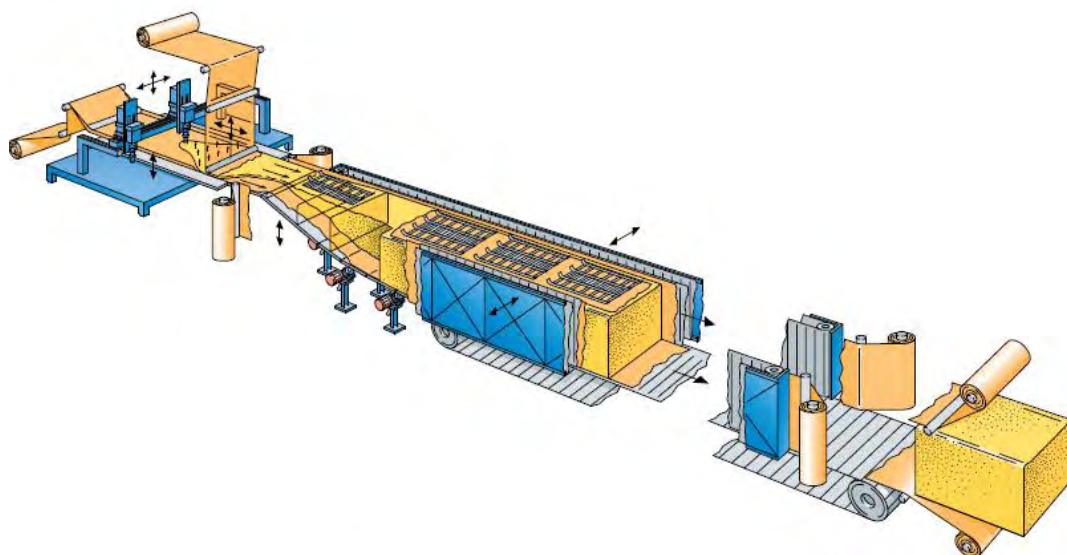


Figura 10 Slabstock (Hennecke Polyurethane Technology 2002)

A NovaFlex tornou-se num padrão da indústria, não só pelas suas vantagens económicas e ecológicas, mas também pela sua elevada fiabilidade de processamento, (Figura 11) e pela qualidade da espuma processada, contribuindo assim para o seu estabelecimento rápido no mercado. Na figura 11 pode-se observar o esquema relativo ao processamento.

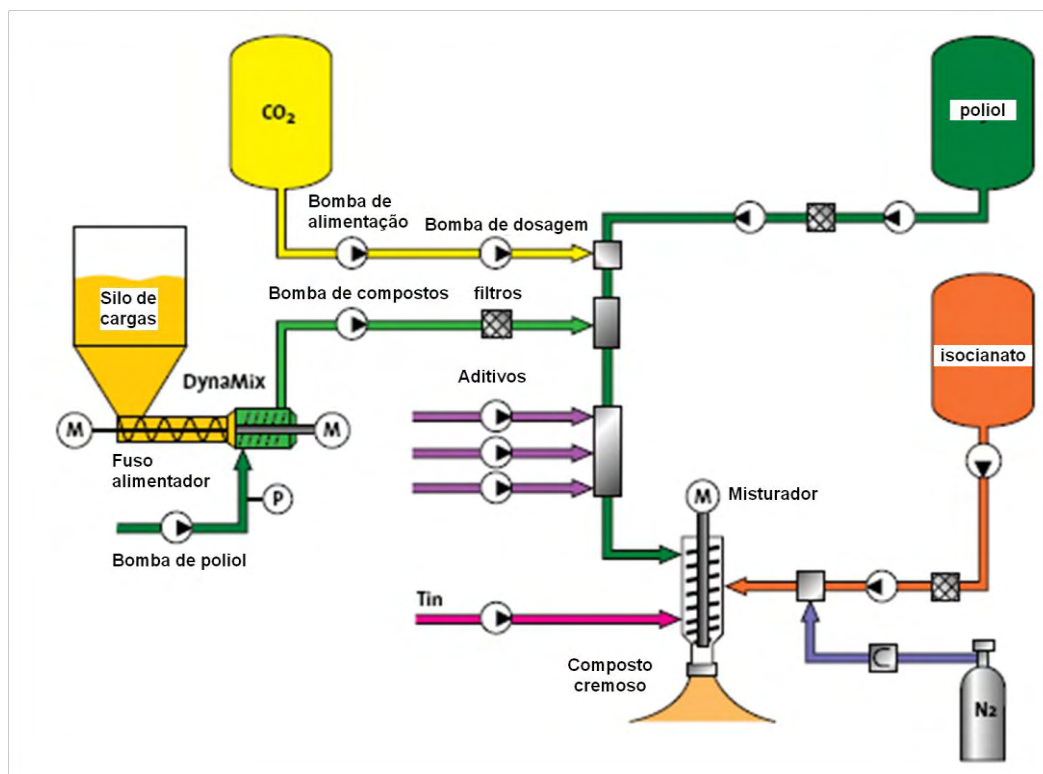


Figura 11 Esquema de processo da NovaFlex-multifill (Hennecke Polyurethane Technology 2002)

Outra solução de processamento proveniente do mesmo fabricante é a topline-HKF 650 que apresenta uma solução interessante no que diz respeito ao sistema de bombagem, Figura 12 e Figura 13. Esta apresenta uma bomba de engrenagem adequada para cargas, com poliol neutro em substituição de óleo hidráulico, cuja transmissão de potência é efectuada por meio de um acoplamento magnético, que evita a contaminação do circuito.

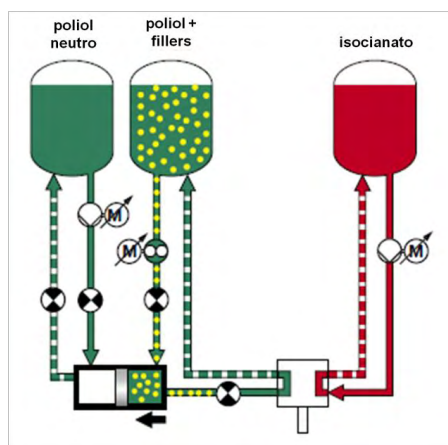


Figura 12 Charging of dividing piston (Hennecke Polyurethane Technology 2006)

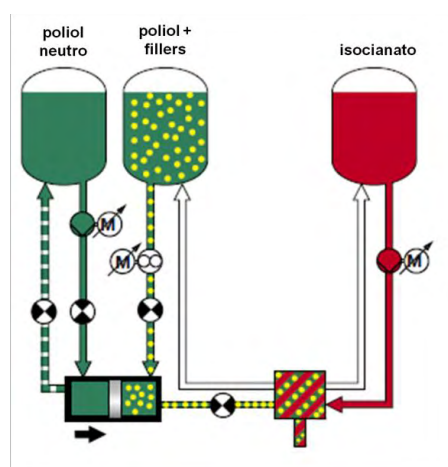


Figura 13 Shot release (Hennecke Polyurethane Technology 2006)

Na Figura 14, é apresentado um exemplo desta linha de produção deste tipo de produtos.



Figura 14 Equipamento topline HK (Hennecke Polyurethane Technology 2002)

O princípio de funcionamento é tão simples como é engenhoso. A bomba de engrenagem bombeia o polioli com cargas para o cilindro dividido, enquanto o polioli simples é transportado de volta para o tanque neutro. Quando o sistema é activado, a pressão gerada pela bomba rotativa sobre o polioli simples, activa o cilindro dividido que, por sua vez, bombeia o polioli com cargas para a cabeça de mistura.

De acordo com Hennecke Polyurethane Technology (2002), o caudal pode ser variado entre as descargas, pois a alta pressão obtida através das bombas é controlada através de conversores de frequência.

O mesmo fabricante possui ainda outro sistema que consiste na produção contínua em bloco. A melamina, grafite expandida, sulfato de bário, pó de PU e carbonato de cálcio são apenas alguns dos enchimentos utilizados para dar uma decisiva propriedade ao componente polioli durante o processo de formação de espuma, de forma a optimizá-lo para seu propósito. O processo anterior exigia a prévia preparação e mistura dos produtos de reacção num recipiente separado com um agitador. De acordo com o seu grau de automatização, este pré-processo de mistura era uma tarefa suja e demorada. Além disso, o recipiente tinha que ser cuidadosamente limpo após a produção para evitar depósitos. No entanto, a maior desvantagem do tão chamado processo em lote é a impossibilidade de influenciar a quantidade adicionada ou a razão de mistura durante a produção. Os utilizadores não tinham outra opção senão utilizar a preparação pronta da mistura de polioli e cargas.

No processo desenvolvido, as cargas são continuamente adicionadas na linha de produção através do princípio de medição de fluxo diferencial. Torna-se assim possível alterar a formulação no decorrer da produção. O processo patenteado permite fornecer uma quantidade definida pelo tanque de polioli para ser calibrada no Premixer, pré-misturador, num fluxo contínuo, (Figura 15). A bomba de material suspenso a jusante, Slurry Pump, é ajustada para um maior caudal. A diferença entre os dois fluxos, é então constituída pela adição de enchimento, que é alimentada em fluxo de polioli por um fuso de alimentação. O premixer mistura posteriormente o pó adicionado com polioli para formar uma mistura homogénea.

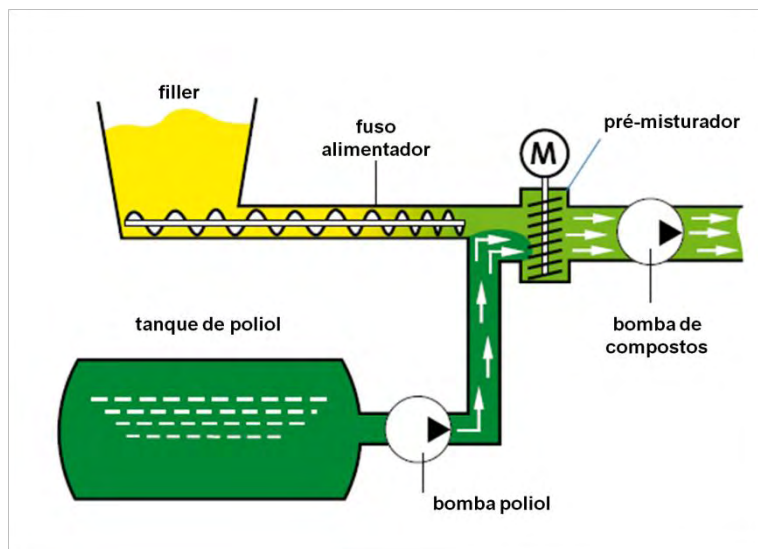


Figura 15 Princípio de funcionamento de misturas de cargas com polioliol (Hennecke Polyurethane Technology 2008)

O princípio da medição de fluxo diferencial também oferece vantagens decisivas após a produção. De forma a evitar quaisquer formações de depósitos, apenas a linha de medição precisa de ser lavada com polioliol, como refere Hennecke Polyurethane Technology (2008).

De acordo com o mesmo autor, a tecnologia da PUR-CSM, transformou uma ideia visionária em realidade. Hoje, muitos utilizadores já a consideram como sinónimo de eficiência, flexibilidade e fiabilidade de processamento. O potencial inerente a esta tecnologia está longe de ser esgotado. No seu estágio actual de evolução, a tecnologia, permite obter componentes reforçados com fibra ou compostos moldados de PU com ou sem carga, através de um processo de pulverização, que pode ser aplicado em seis diferentes campos. O que é de interesse especial é a versatilidade proveniente da sua multifuncional e multicomponente técnica de pulverização e processamento de PU com cargas, Figura 16.



Figura 16 Exemplo A, pulverização de PU com cargas da CSM (Hennecke Polyurethane Technology 2008)

Esta variedade de possibilidades pode ser atribuída ao facto de todas as variantes do processo serem essencialmente baseadas no conceito de pulverização.

O módulo chopped-fibre, cortador de fibra, pode ser utilizado tanto para o corte de fibra como componente de grandes avanços tecnológicos para produzir a fibra reforço ou como útil e eficiente módulo, fornecendo reforço local no produto semi-acabado, Figura 17. Taxas de saída entre 30g / s e 300 g / s podem ser obtidas usando apenas um bico de pulverização de disparo para disparo, componente a componente ou mesmo dentro da mesma peça (Hennecke Polyurethane Technology 2008).



Figura 17 Exemplo B, pulverização de PU com cargas da CSM (Hennecke Polyurethane Technology 2008)

A máquina RIMDOMAT, pertencente ao grupo de máquinas RIM, opera com recurso a cilindros de curso lentos, como bomba alternativa de êmbolo único. Este sistema é particularmente adequado para a produção de peças moldadas de alta qualidade, tais como cavas de roda ou pára-choques de veículos. Cada cilindro da RIMDOMAT tem a sua própria unidade de motorização e controlo. A interligação é forçada por um yoke "electrónico", ou seja, dispositivo à prova de erro.

O controlo RIMDOMAT atende a várias exigências: formulações, medição de velocidade e volume de descarga que são digitalmente programáveis. A medição de velocidade e índice pode ser variável de descarga para descarga dependendo do programa seleccionado. As características especiais do RIMDOMAT consistem na reacção independente do sistema de medição com alta precisão. A fixação do volume de descarga não é medida pelo tempo, mas pelo controlo de impulsos. A RINDOMAT possui um sistema de medição resistente ao desgaste, mesmo usando cargas abrasivas, o processamento é conseguido de forma segura e absolutamente sem problemas.

O equipamento é accionado por uma unidade hidráulica. A medição dos componentes é realizada através de dois êmbolo de cilindro, cada um de forma independente e equipados com amplificadores lineares, motor de passo e hidráulico. Este sistema de accionamento de completo controlo electrónico, de sequência de pulso emitida por um gerador de frequência, é convertido num movimento do hidráulico. Isto é, realizado com elevada reprodutibilidade de precisão. Devido às características especiais da RIMDOMAT, poliuretanos com e sem cargas, mesmo as de alta viscosidade, podem ser processados. Em combinação com as diferentes cabeças de alta pressão é possível adequar a máquina a cada requisito individual, Figura 18.

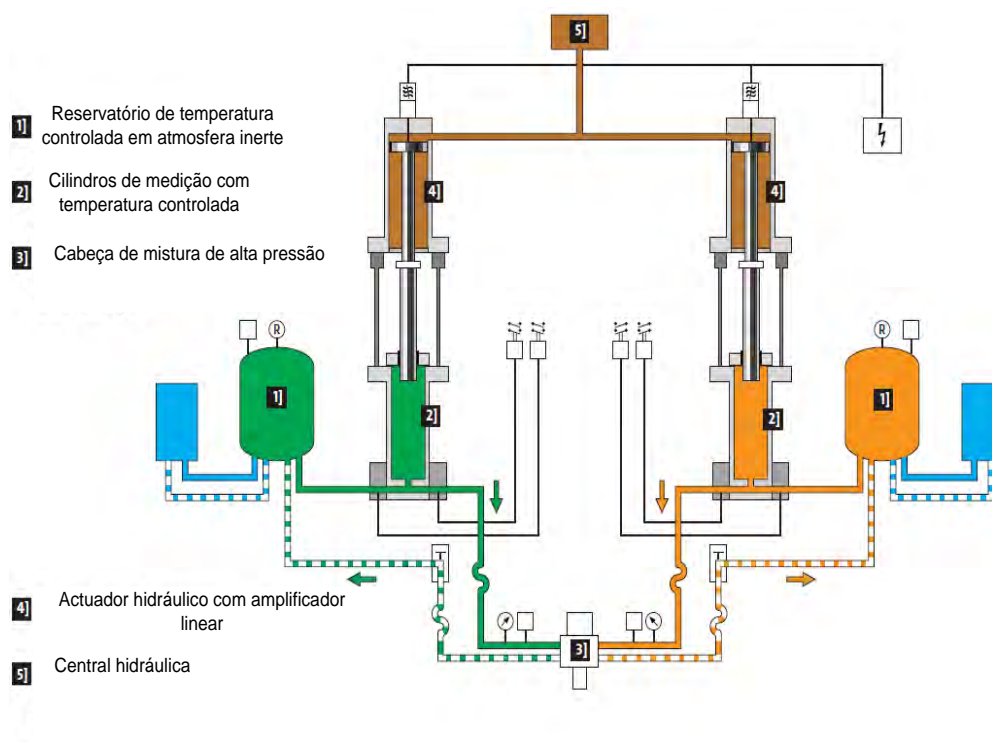


Figura 18 Princípio de funcionamento do equipamento Rimdomat (Hennecke Polyurethane Technology)

Com o equipamento de medição de cilindros, a exactidão de medição depende unicamente da precisão da velocidade do cilindro que por sua vez, depende da precisão do sistema de accionamento. A maioria das unidades de medição existentes no mercado que usam cilindros, estão equipadas com simples servo controladores hidráulicos, que controlam válvulas num sistema de malha fechada. Isto requer:

- Medição da velocidade do cilindro;
- Comparação com o valor fixado;
- Reajuste da válvula;
- Ajuste da velocidade do cilindro.

A RIMDOMAT usa como sistema de medição o cilindro sem reajustamento da velocidade/medição. Reajustes são correcções de avarias. A RINDOMAT não requer de qualquer correcção. O sistema mede correctamente desde inicio sem qualquer tipo de desvio. Cada cilindro de medição é equipado com amplificador delinear. A velocidade

deste é controlada com precisão até frequências de 10 kHz, i.e. 10.000 pulsos por segundo, dependendo de cada tipo. Cada pulso individual é contabilizado e corresponde a um curso mínimo do cilindro de medição. Cada dos 10.000 golpes por segundo é tão preciso como os próximos, sem qualquer nova medição.

O amplificador linear funciona independentemente da pressão gerada. Isto é especialmente importante durante as fases críticas da operação da cabeça de mistura ou seja, no início e no final de uma descarga, a fim de evitar falhas nos estágios iniciais e finais da mistura.

O perfeito controlo electrónico permite descargas muito curtas (como descargas de apenas 0,7 segundos).

A RIMDOMAT está equipada com um *software* específico para o controlo electrónico. Todo o controlo do equipamento pode ser realizado através de um monitor, o que apresenta uma grande flexibilidade, absoluta e precisa reprodutibilidade através da pré-selecção digital do rácio de mistura e da quantidade da descarga. Existe ainda a possibilidade de configurar outro tipo de saídas e rácio de misturas para cada material. Também possui um diagnóstico de erros e capacidade de os mostrar em texto (Hennecke Polyurethane Technology).

2.6.1 Cabeças de mistura

A qualidade do produto e o seu custo efectivo estão predominantemente ligados à performance da cabeça de mistura. A cabeça de mistura é o dispositivo onde se dá o impacto entre os jactos dos dois reagentes do termoendurecível, Figura 19, com o objectivo de realizar uma mistura o mais homogénea possível.

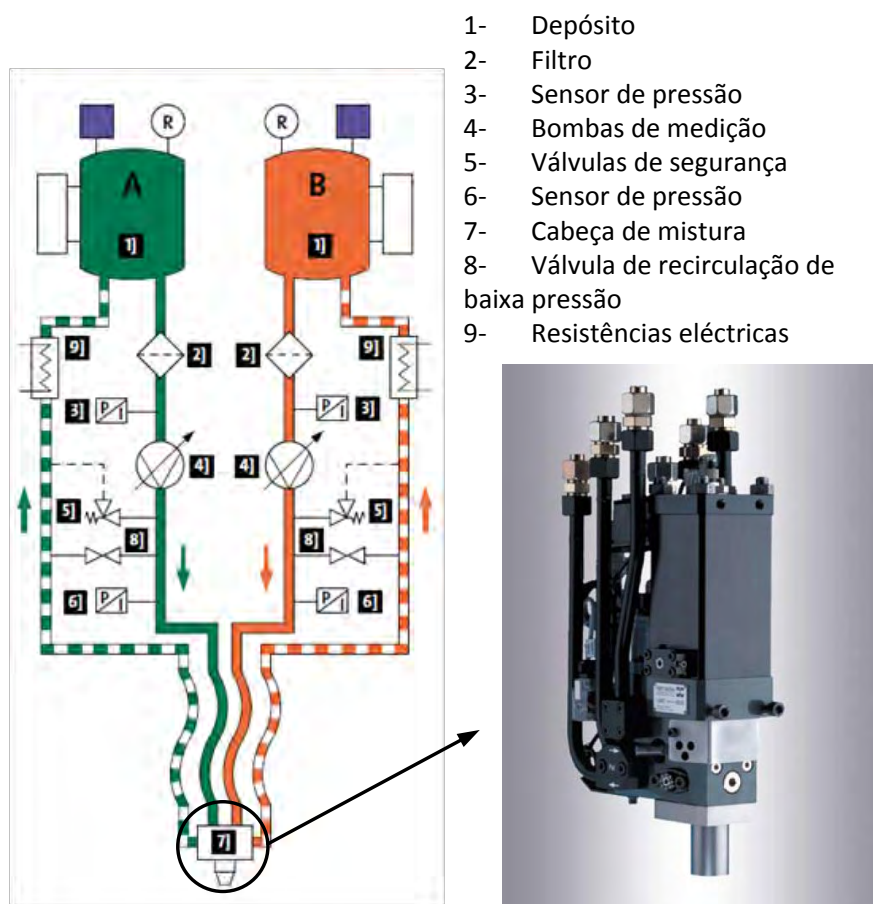


Figura 19 Diagrama de processo de máquina de RIM (Hennecke Polyurethane Technology)

Ainda como refere Hennecke Polyurethane Technology (2008), as cabeças de mistura podem ser equipadas com ejectores de pressão balanceada. Com esta configuração a pressão de mistura é mantida constante automaticamente durante toda a operação de injeção. Qualquer alteração na produção não necessita de reajustes nos ejectores.

De seguida serão apresentados dois sistemas de cabeça de mistura para alta pressão: o princípio MX e o princípio ML.

O princípio MX, Figura 20, é caracterizado por uma mistura tipo choque, em que os ejectores estão dispostos numa posição angular num arranjo coaxial com o êmbolo de limpeza. O sistema de recirculação é do tipo entalhe controlado e a limpeza é conseguida através de um êmbolo.

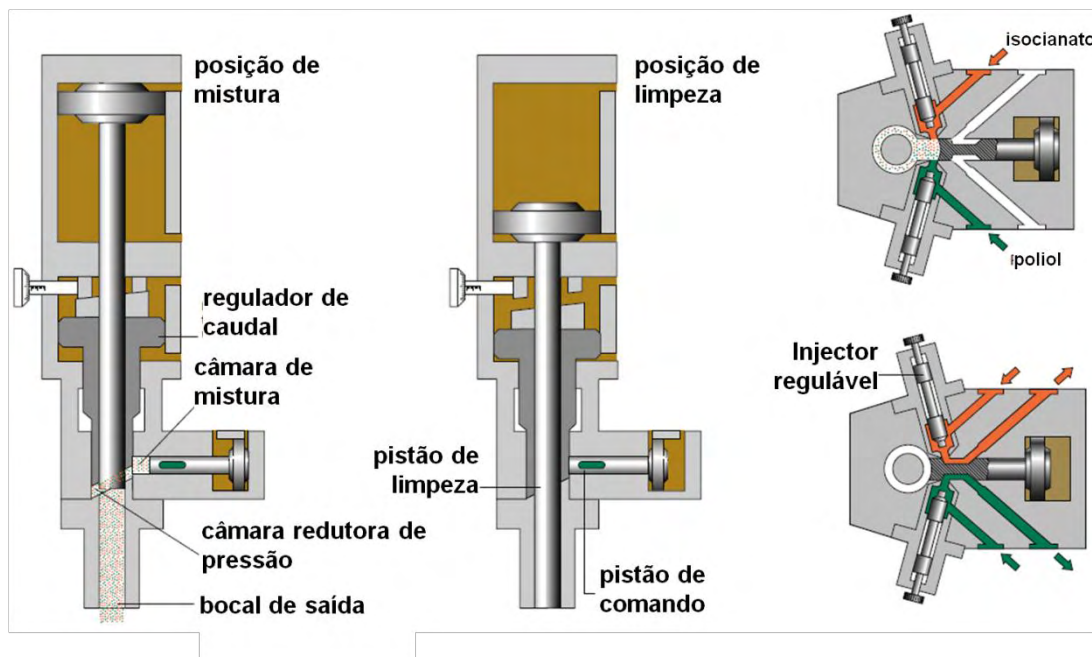


Figura 20 Princípio de funcionamento da cabeça de mistura MX (Hennecke Polyurethane Technology)

Apresenta como vantagens a eficiência de mistura e reprodutibilidade melhoradas, regulação da pressão simplificada, adequada para sistemas de espumas. Este tem como aplicações:

- Espumas flexíveis de cura a frio;
- Espumas integrais rígidas e semi-rígidas;
- Sistemas compactos;
- Espumas com cargas;
- Espumas de absorção de energia;
- Espumas rígidas insufladas.

A cabeça de mistura com princípio ML, é também caracterizada por uma mistura obtida por choques de jacto e os injectores estão dispostos em oposição de cada lado da pequena câmara de mistura. A sua limpeza é conseguida através da injeção de ar comprimido. Este princípio tem como principal aplicação as espumas rígidas, Figura 21.

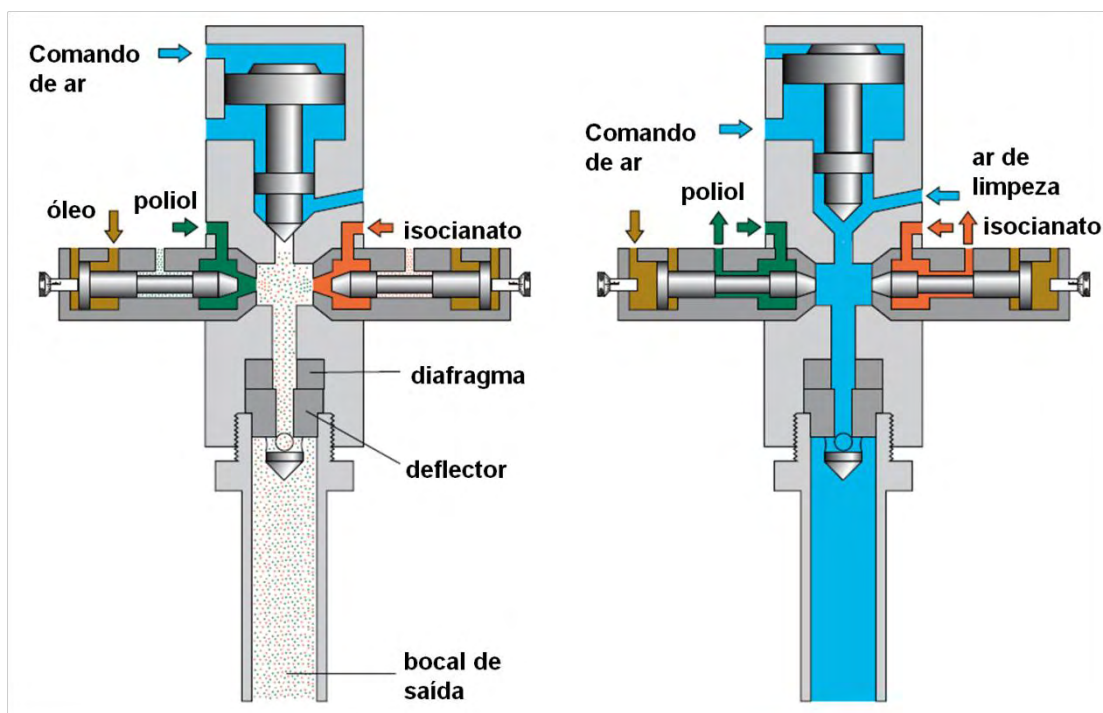


Figura 21 Princípio de funcionamento da cabeça de mistura ML (Hennecke Polyurethane Technology)

Para equipar sistemas de RIM de baixa pressão, a Cannon disponibiliza algumas soluções interessantes, desde os propósitos gerais às micro descargas com muitos baixos caudais até aos mais elevados.

Segundo Cannon Polyurethane Technology, o padrão das cabeças de mistura de baixa pressão, para aplicações gerais, é constituído por um número de versões desenvolvidas para nichos específicos de produção, exigindo uma dosagem e mistura de PU, não só formulações de PU, mas também silicones, elastómeros e resinas epoxy com diferentes propriedades químicas e físicas. Exemplos destas cabeças podem ser vistos na Figura 22.

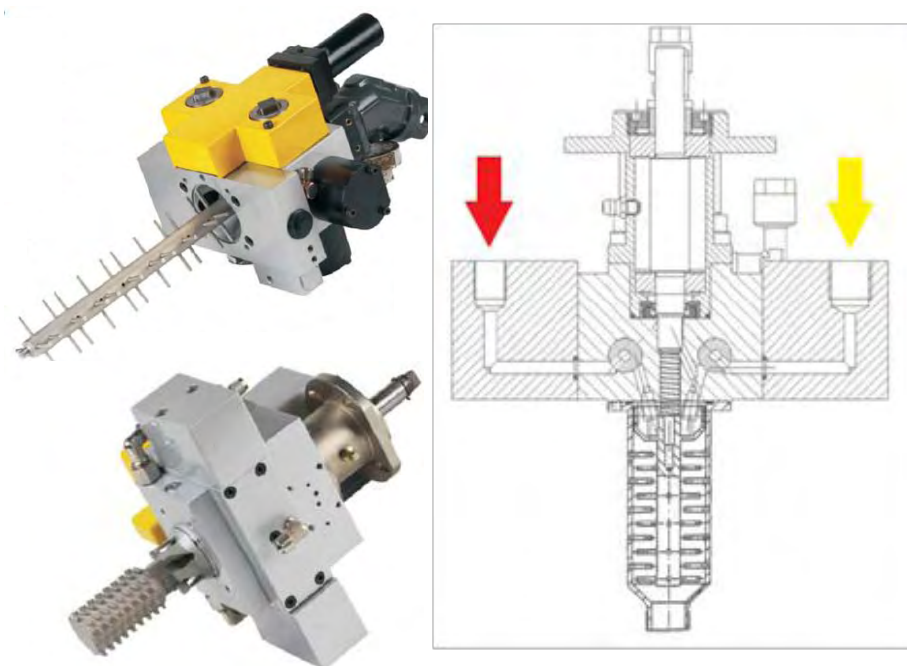


Figura 22 Exemplos de cabeça de mistura de baixa pressão (Cannon Polyurethane Technology)

Outra solução, segundo Cannon (2009), que tem como objectivo a inclusão de cargas de poliuretano reciclado em pó num termoendurecível, consiste em adicionar um terceiro jacto de material na cabeça de mistura como mostra a Figura 23.

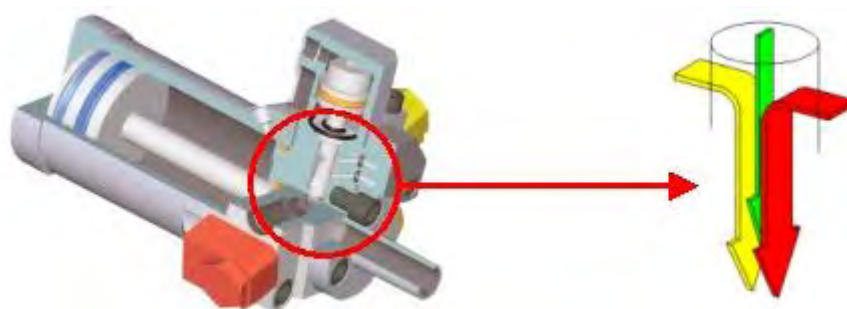


Figura 23 Inclusão de terceiro jacto de material, cargas de poliuretano reciclado em pó (Cannon Polyurethane Technology)

O poliuretano reciclado é muito interessante para os fornecedores de espumas flexíveis para a indústria automóvel. Em particular, o pó de poliuretano reciclado pode ser usado em altas percentagens na produção da parte posterior dos bancos de automóveis e encostos de cabeça, onde os requisitos mecânicos e propriedades físicas das espumas são menos exigentes.

Para alcançar este objectivo, a Cannon fez uso da sua experiência no processo de injeção para aplicações especiais e desenvolveu um produto específico para cargas sólidas. Este equipamento tem a capacidade de dosear e misturar três componentes diferentes usando para isso três jactos axiais, sem que tenha de usar o poliol para transportar as cargas como habitualmente acontece.

As cargas em pó muito fino entram na cabeça de mistura pelo local onde geralmente é adicionada a pasta colorante.

Foi desenvolvido no IPL nomeadamente na ESTG, um equipamento de RIM, cujo propósito servia a investigação de novos materiais, nomeadamente poliuretanos com cargas.

O equipamento tem o nome de VMAP, Versatile Moisture Adsorbing Polymers. O objectivo da utilização deste equipamento era o de estudar o comportamento dos materiais à absorção da água. O equipamento protótipo de cariz laboratorial foi produzido e tem vindo a cumprir os objectivos para os quais foi produzido.

Como se pode observar a partir da Figura 24, a máquina incorporava dois depósitos independentes, um para o isocianato e outro para poliol. O material é doseado através de duas bombas de pistão accionadas pneumáticamente e é injectado através de um misturador estático. Todo o controlo é efectuado por meio de válvulas e cilindros pneumáticos o que torna o equipamento bastante simples mas eficaz. É de ressaltar ainda, que a temperatura é controlada em todo o circuito utilizado pelos dois componentes do poliuretano.

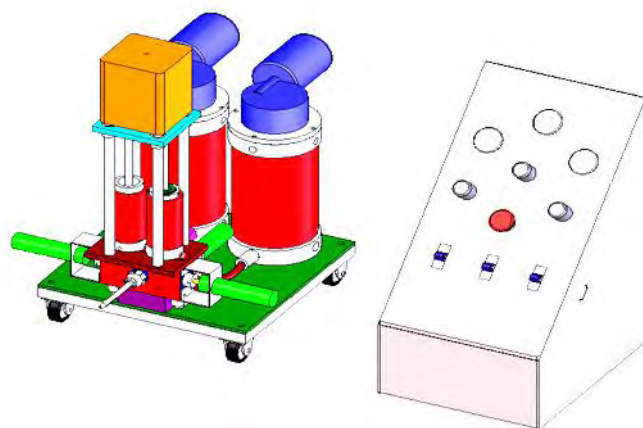


Figura 24 Desenho CAD da VMAP (fonte: projecto VMAP)

2.7 Extrusão reactiva

A extrusão reactiva surge no decurso do trabalho de pesquisa quando se analisavam métodos de processamento de termoendurecíveis com cargas diferentes.

A extrusão reactiva é um processo referido vulgarmente na bibliografia relacionada com, processamento de plásticos e equipamentos de extrusão.

Janssen (2007) afirma que, historicamente as extrusoras começaram a ser vistas como reactores em 1950. Uma patente da *Dow Chemical Company* descreve uma unidade de polimerização, em que uma extrusora de fuso simples é usada com principal mecanismo de polimerização. Após pré-processamento a polimerização necessitava de 18 horas dentro da extrusora para o processo de transformação estar completo.

Brown (1988) defende que, a extrusão reactiva, é uma tecnologia com grande interesse, pois as extrusoras podem fundir, bombear, misturar e devolatizar os materiais plásticos. Além disso, apresentam características necessárias para o desenvolvimento de reacções químicas durante o processo de extrusão dos materiais poliméricos. Este processo pode ser utilizado em materiais termoplásticos e termoendurecíveis. A vantagem mais significativa deste processo é a utilização da extrusora como reactor químico, controlando adequadamente o tempo, a temperatura de reacção e a combinação de diversas operações num único equipamento, obtendo-se excelentes rendimentos no que diz respeito à velocidade de processamento e espaço usado pelo equipamento. Neste caso, o equipamento de extrusão é utilizado como um reactor químico, e não somente como uma ferramenta de processamento. Também é possível obter grande versatilidade pela utilização de duas ou mais extrusoras conectadas em série.

O tempo disponível para a reacção na extrusora é determinado pela relação entre o comprimento do cilindro e o diâmetro do fuso (L/D), pelas taxas de alimentação de material polimérico e pela velocidade de rotação do fuso. O tempo disponível para a reacção também pode ser variado através da utilização de um alimentador secundário. Este alimentador pode ser utilizado quando um reagente, sensível ao calor, é utilizado no processo. O reagente pode ser adicionado num estágio avançado, mais próximo da matriz, para minimizar o tempo de residência. As zonas individuais de reacção, submetidas a

pressões diferentes, podem ser isoladas entre si por zonas de selagem. Nestas zonas, a geometria do fuso pode oferecer restrição ao fluxo pelo uso de uma hélice com ângulo perpendicular ao eixo (elementos misturadores). O material fundido pode acumular-se nesta zona, preenchendo totalmente o espaço entre o fuso e a parede do corpo da extrusora. Estas zonas de selagem são aplicadas antes e após as zonas de alimentação de reagentes e de vácuo.

Segundo Janssen (2007), os tipos de reacções mais significativas, sofridas pelos polímeros em extrusoras, podem ser divididos em quatro categorias:

- Polimerização em massa. Em reacções de polimerização em massa, um polímero é formado a partir de um monómero ou de um pré-polímero de um material de baixo peso molecular. Polimerizações em massa são tradicionalmente subdivididas em reacções de adição e de condensação;
- Reacções de funcionalização. Correspondem à introdução de grupos funcionais na cadeia de um polímero através da reacção entre polímero e monómero, ou ainda, à modificação de grupos funcionais existentes;
- Copolimerização. Trata-se de uma reacção entre dois ou mais polímeros para formar um copolímero. Este tipo de reacção, muitas vezes envolve a combinação de grupos reactivos de diferentes polímeros para formar um copolímero.
- Reacções de degradação. Estas são usadas para diminuir o peso molecular de polímeros para atender o desempenho de produtos específicos. A degradação é obtida através do aquecimento ou pela adição de produtos químicos.

Ainda segundo o mesmo autor, devido às suas características específicas, a extrusora tem algumas vantagens como reactor de polimerização e de reacções de modificação. A extrusora é uma “bomba” estável para polímeros altamente viscosos, garantindo um fluxo constante, importante para o funcionamento como reactor contínuo. A mistura pode ser ajustada às necessidades do processo através de uma selecção criteriosa do fuso a utilizar. Neste processo de polimerização são necessarias poucas ou nenhuma quantidades de solventes. Devido à ausência de solventes voláteis, o processo torna-se, naturalmente mais amigo do ambiente.

No entanto, também existem algumas restrições ao uso de extrusoras como reactores de polimerização. Como a extrusora é um reactor com um volume relativamente pequeno, o tempo de permanência do material a processar, necessário para a reacção deve ser curto. Consequentemente, a cinética da reacção tem que ser suficientemente rápida para ser um processo economicamente viável. Existe uma limitação para as relações L/D que podem ser executadas em extrusoras, com base no calor de reacção, devido à viscosidade. Se a entalpia da reacção for muito elevada, o aumento de temperatura na extrusora será demasiado elevado para ser controlado. Além disso, a viscosidade do produto de reacção tem de ser suficientemente elevado para ser possível obter um transporte do material estável.

A extrusora de duplo fuso aparece como solução à dificuldade em escalar as extrusoras de fuso único. Tempos de estágio do material dentro da extrusora, para se dar a polimerização em 30 minutos, tornaram-se possíveis com extrusoras de duplo fuso engrenado co-rotativo.

Mais recentemente têm sido realizados estudos relativos ao processo de polimerização em extrusoras de duplo fuso co-rotativo. Um trabalho de pesquisa efectuado, sobre a extrusão reactiva, revelou que cerca de 600 patentes foram submetidas entre 1966 e 1983 envolvendo 150 empresas. No entanto foram apenas encontrados 57 artigos técnicos e destes, apenas 3 pertenciam a estas empresas. Nestes trabalhos de investigação, relativos à extrusão reactiva são utilizadas extrusoras de duplo fuso. Existe pouco conhecimento científico acerca da estabilidade do processo de extrusão reactiva, especialmente no que diz respeito à transição de misturas de muito baixa viscosidade a elevada viscosidade. Consequência das suas características intrínsecas, as extrusoras têm varias vantagens quando utilizadas como reactores de polimerização. Como a extrusora é uma “bomba” estável, para materiais de alta viscosidade, é garantido um caudal constante, característica vital quando o que se pretende é ter um reactor contínuo. Consequentemente, ao contrário de grande parte dos processos convencionais, a extrusora permite um processo contínuo.

Com base em design adequado é possível ajustar a mistura e assegurar uma reacção eficiente. Uma outra vantagem prende-se com o facto de não ser necessário (ou só em pequenas quantidades), a utilização de solventes, que podem ter custos significativos com a manutenção do sistema de processamento. Como consequência de não serem utilizados solventes voláteis, o processo é naturalmente amigo do ambiente, o que vai de encontro à legislação ambiental que é cada vez mais restritiva.

Existem, no entanto, aspectos menos positivos com várias restrições que dependem do tipo de extrusora a ser utilizada.

A extrusora é um reactor tanto mais dispendioso quanto maior o seu volume. O tempo de reacção tem que ser curto de modo a não ser necessário um elevado volume de reactor, o que o tornaria demasiado oneroso.

A viscosidade do produto da reacção deve ser superior a um limite mínimo, de modo a conseguir-se um transporte de material razoavelmente estável. Devido às enormes variações de viscosidade durante a reacção, pode dar-se alguma instabilidade resultante de flutuações de caudal.

As reacções multicomponente, tratadas neste trabalho, ocorrem predominantemente a partir de dois componentes imiscíveis. Como a reacção ocorre principalmente na interface destes, as micromisturas tomam um papel importante, onde as extrusoras de fuso duplo têm vantagens reconhecidas em comparação com as restantes.

Em suma, as extrusoras têm inúmeras vantagens quando usadas como reactores químicos, providenciando uma mistura eficaz, boa capacidade de transferência de energia térmica e excelentes capacidades para bombear matérias com viscosidades elevadas.

2.8 Extrusora

O princípio básico da extrusora consiste num equipamento com um ou mais fusos, no interior de um cilindro aquecido, conforme se observa na Figura 25. Os polímeros sólidos, na forma de grânulos ou pós-aglomerados, são colocados numa tremonha e, por

gravidade, os grânulos a partir da zona de alimentação são então transportados, plastificados, homogeneizados e pressurizados ao longo do processo de extrusão. Um fluxo contínuo de polímero fundido flui através do bocal para ser conformado. A principal variável de projecto reside no dimensionamento do fuso, ou seja, na determinação do seu diâmetro e comprimento, além do perfil da hélice. Cada perfil corresponde a uma necessidade específica determinada pelo tipo de material polimérico, capacidade de processamento, mistura ou remoção de voláteis.

Apesar das diferenças de perfil, os fusos apresentam em comum uma maior profundidade de canal na secção de alimentação devido à maior densidade aparente das partículas sólidas de material a processar. Na extremidade final do fuso, o canal é menos profundo com o objectivo de pressurizar (compressão) o polímero fundido, minimizando as flutuações de caudal. Os diâmetros dos fusos variam na faixa de 20 mm a 500 mm. Os fusos são caracterizados com base na relação do comprimento versus diâmetro do fuso (L/D). Os valores tipo de relação L/D variam de 10 a 40 mm. Os produtos voláteis resultantes das reacções, bem como reagentes em excesso, podem ser removidos através da utilização de um sistema de vácuo numa zona específica. Esta zona é geralmente configurada com uma geometria adequada, de modo a permitir uma exposição suficiente da mistura fundida à atmosfera de baixa pressão.

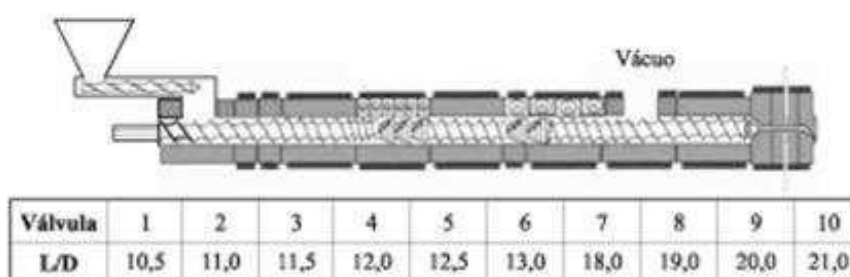


Figura 25 Desenho esquemático de uma extrusora (Ito et al 2004).

As misturas poliméricas miscíveis, são aquelas, entre pelo menos dois polímeros, que possuem uma única fase e temperatura de transição vítrea, T_g , e que têm homogeneidade entre as fases na faixa 5-10nm, como refere Paul & Newman (1978). Misturas poliméricas compatíveis, são aquelas que não possuem fortes forças repulsivas e são visualmente homogêneas. A compatibilidade é caracterizada pela existência de interacção entre as fases numa escala molecular. Uma mistura polimérica imiscível pode

ser compatível desde que, apresente boas propriedades finais dentro das especificações desejadas. Uma mistura polimérica é considerada incompatível quando as propriedades requeridas estão abaixo dos valores dos materiais poliméricos separadamente. A mistura pode ser otimizada, através de técnicas de compatibilização (UTRACKI 1989).

Após esta fase introdutória é importante referir os tipos de extrusoras existentes e suas principais características.

As extrusoras podem ser classificadas em extrusoras de fuso único ou duplo fuso, (Figura 26). Esta característica tem uma influência significativa no mecanismo de transporte do material a processar. Na extrusora de fuso único o mecanismo de transporte é baseado no atrito entre o polímero e as paredes do canal do fuso. Se o polímero escorregar no cilindro, é fácil imaginar que o material gira com o fuso sem ser transportado para a frente. Isto faz com que este tipo de solução esteja fortemente dependente das forças de atrito geradas entre as paredes do fuso e o polímero.

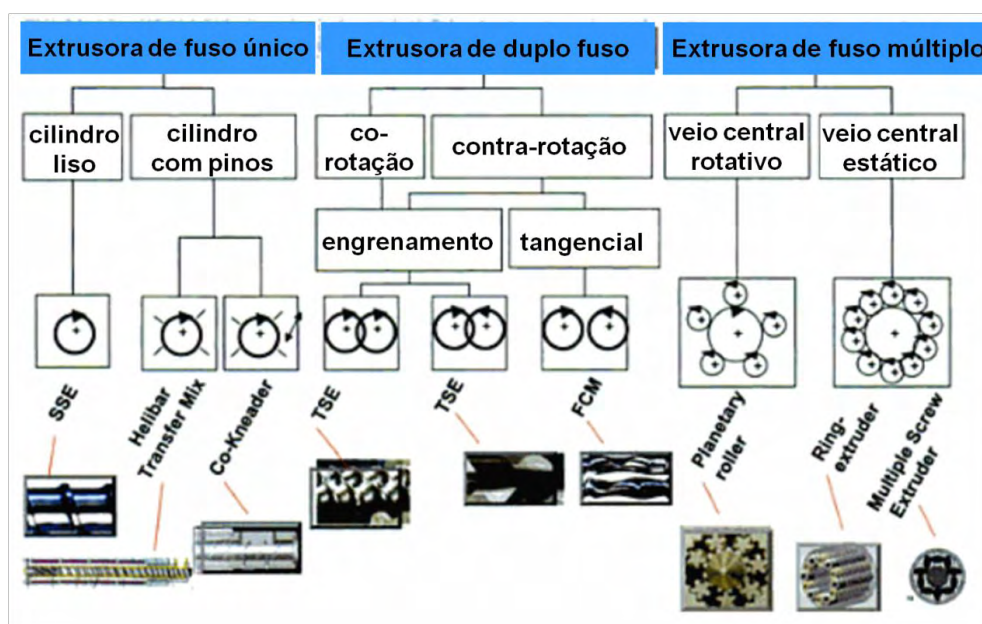


Figura 26 Classificação das extrusoras pelo número de fusos (Kohlgruber 2008)

Consequentemente, pode-se afirmar que as extrusoras de fuso único são menos adequadas para a extrusão reactiva.

A Figura 27 mostra o corpo de uma extrusora de duplo fuso, com dois fusos montados paralelamente num corpo com uma forma interior tipo 8.



Figura 27 Corpo de um extrusora da ZSK, monobloco (esquerda) e bloco com inserto (direita) (Kohlgruber 2008)

No caso em que existe engrenamento dos fusos, os flancos de um fuso engrenam nos flancos do segundo. Como consequência desta opção técnica, o material a processar não pode rodar com o fuso, quaisquer que sejam as suas propriedades reológicas.

Consequentemente nas extrusoras de duplo fuso engrenado, a acção de transporte depende muito menos das características do material a processar quando comparadas com as extrusoras de fuso único.

Na Figura 28, são apresentados os principais tipos de configurações de fusos para extrusoras de duplo fuso.

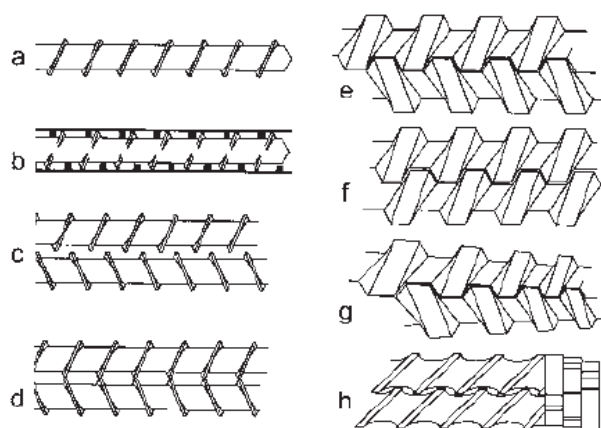


Figura 28 Configurações de extrusoras: (a) fuso único, (b) co-misturadora, (c) modo de mistura sem engrenamento, (d) modo de transporte sem engrenamento, (e) contra-rotação engrenamento completo, (f) co-rotação engrenamento completo, (g) contra-rotação cónica e (h) auto-limpeza em co-rotação (Janssen 2007)

As extrusoras co-misturadoras (Figura 28, b) têm um único fuso enquanto que, o corpo está equipado com pinos para ser optimizado o processo de mistura. O fuso gira e oscila proporcionando uma mistura relativamente homogénea. Os pinos também podem ser utilizados para monitorizar a temperatura acoplado sensores ou como injectores de

material. Os pinos impedem, também o polímero de rodar com o fuso assegurando deste modo, uma operação mais estável que a extrusora de fuso único (Figura 28, a).

Na extrusora de duplo fuso tangencial (Figura 28, c e d) os fusos não estão engrenados, pelo que, podem ser considerados como duas extrusoras de fuso único com interacção mútua. Os fusos podem ser montados de duas maneiras diferentes, em modo de mistura (Figura 28, c), ou em modo de transporte (Figura 28, d). Todas as extrusoras deste tipo funcionam em contra-rotação.

As extrusoras de fuso duplo com engrenamento completo, em contra-rotação (Figura 28, e) e co-rotação (Figura 28, f), podem ser melhor modeladas como uma série, de câmaras em C. Devido à rotação dos fusos estas câmaras transportam o material desde a zona de alimentação para a fieira, enquanto ocorrem interacções entre as câmaras através do escoamento de material do canal de um fuso para o outro. Em geral, estes espaços de comunicação são maiores nas máquinas em co-rotação do que nas em contra-rotação. Devido à elevada resistência criada ao contra fluxo, através destes espaços entre canais, as extrusoras possuem uma forte característica de transporte e a sua estabilidade é grande.

Os fusos e o corpo das extrusoras de fuso duplo com engrenamento completo, também podem ser cónicas (Figura 28, g). Isto tem vantagens para o processo de alimentação, quando o material tem uma densidade baixa. À medida que o material a processar avança, as câmaras diminuem gradualmente de tamanho para ser possível compactar o material. Além disso, os fusos cónicos podem fornecer um maior espaço para montagem dos rolamentos de apoio dos fusos e podem ser facilmente removidos caso, por exemplo, numa intervenção de manutenção.

Dependendo da geometria exacta, as extrusoras de duplo fuso co-rotativas em auto-limpeza (Figura 28, h) podem ser descritas de duas formas. Estas podem ser modeladas como uma série de câmaras C com folgas amplas ou, o que é mais comum, podem ser construídas com canais contínuos, com algumas restrições de fluxo, em intervalos regulares. Este tipo de solução impõe enormes forças de corte sobre o material a processar, especialmente quando os elementos do fuso têm um desenho específico para este efeito. São possíveis configurações do fuso com dois ou três lobos, Figura 29.

Fusos de lobo duplo possuem uma melhor capacidade de transporte, apresentando um maior rendimento; fusos de três lobos têm uma maior resistência mecânica e maiores forças de corte. A maioria das máquinas modernas tem fusos de duplo lobo. Na Figura 29 estão representados os lobos para cada tipo de fuso e o ângulo em que são montados.

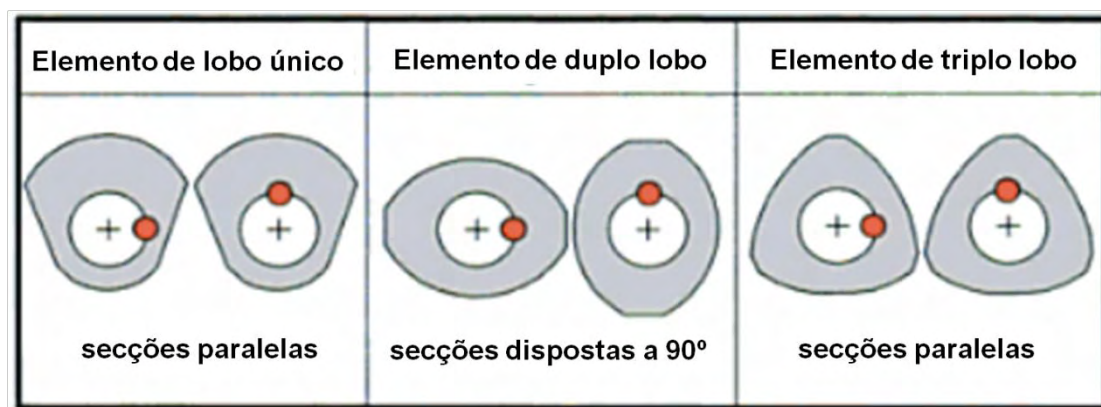


Figura 29 Secções de fuso, da esquerda para a direita, fuso com lobo único, fuso de duplo lobo e fuso de três lobos (Kohlgruber 2008)

As extrusoras de duplo fuso co-rotativo com auto-limpeza podem operar com rotações elevadas, sendo a eficiência de transporte (quantidade de material transportado por revolução), mais reduzida nestas que nas extrusoras de engrenamento completo.

Em geral pode-se concluir que, devido às enormes forças de corte no canal e pela simples aplicação de elementos de mistura, as extrusoras de duplo fuso co-rotativo em auto-limpeza são as mais adequadas para o processamento de materiais compostos. Na extrusão reactiva a elevada acção de corte destas máquinas é particularmente conveniente quando se pretende uma mistura homogénea de material a processar.

Capítulo 3 **Desenvolvimento e Fabrico do Equipamento MixFill**

3.1 Introdução

O nome Mixfill nasceu da conjugação de dois princípios fundamentais que estão presentes no equipamento desenvolvido para injeção de termoendurecíveis com reforço. Mix, de “mixture”, que representa a capacidade do equipamento em misturar e homogeneizar um material, proveniente da mistura de três materiais diferentes, tipicamente dois componentes de um material termoendurecível com cargas sólidas. Fill, do termo em inglês “Filler”, que significa cargas, material adicionado ao material polimérico. Estas são as duas principais características do equipamento: processar de forma homogênea, e processar material polimérico com cargas.

3.2 Motivações e Requisitos

Havia necessidade de se desenvolver um equipamento com a finalidade de processar materiais poliméricos com cargas.

No trabalho de pesquisa efectuado, foram encontrados diversos trabalhos de caracterização mecânica de materiais poliméricos (resina epóxida ou poliéster) com cargas de madeira, cortiça, micro esferas de vidro ou até mesmo cargas metálicas. O processo utilizado no processamento destes materiais foi a mistura manual. Este processo pode não garantir uma boa homogeneidade do material e, por outro lado, há dificuldades em controlar os parâmetros do processo.

No mercado nacional existem várias empresas a trabalhar na área do plástico reciclado (Figura 30), proveniente de reciclagem de materiais domésticos, cujas principais aplicações destes materiais podem ser mobiliário urbano, estacaria, paletes, pontes pedonais, placas sinalizadoras, pavimentos, entre outros. O material proveniente de reciclagem pode ser utilizado como cargas, um pouco como alternativa à madeira que requer alguma manutenção, especialmente quando expostas às intempéries, como exemplifica a Figura 31.



Figura 30 Material proveniente da reciclagem doméstica e industrial

O processamento destes materiais reciclados é identificado pelas empresas como um problema a resolver, devido à grande variedade de materiais, equipamentos disponíveis e controlo das variáveis de processamento. Consequentemente, existe a necessidade de melhorar o processo de injeção com moldação por intrusão utilizado, ou se inova desenvolvendo uma outra forma de processamento.

A moldação por intrusão consiste na utilização de uma extrusora, vários moldes rotativos, e um tanque de refrigeração de água. O material é misturado e fundido na extrusora e, em seguida, é injectado num dos moldes. Depois do molde estar completamente preenchido, o sistema de moldes roda permitindo que outro molde fique em posição de receber material processado da extrusora. O molde preenchido passa pelo tanque de água para arrefecer o molde, e depois dá-se a desmoldação. O processo altamente produtivo tem capacidade de produzir peças de paredes espessas, tais como paletes.

O equipamento desenvolvido neste trabalho, pode vir a resolver o problema relativo ao processamento destes materiais. A inovação deste equipamento prende-se com o facto de utilizar material reciclado como cargas num processo de injeção de termoendurecíveis com elevada fracção volúmica de cargas. A utilização deste equipamento irá permitir resolver problemas de homogeneidade, provenientes da dificuldade de processamento de vários materiais termoplásticos com propriedades tão distintas, como é o caso da temperatura de transição vítrea do polycarbonato 155° e do

polietileno 69°. Esta situação leva a que algum material não funda, podendo ocorrer defeitos no material processado que podem levar à rotura do componente processado quando solicitado.



Figura 31 Exemplo da aplicação de um pavimento com termoplástico reciclado (Extruplas 2009)

A VMAP, equipamento referido no segundo capítulo, foi pensada e construída de forma a poder responder às necessidades de uma empresa, Brownell Ltd. Esta empresa Londrina comercializa produtos para prevenir problemas causados pela humidade proveniente da condensação em sistemas pressurizados, e ainda produtos relacionados com o controlo de pressão. A Brownell comercializa dissecadores, indicadores de humidade, sistemas de purga e válvulas de descargas, entre outros. Em colaboração com a Universidade de Reading, esta empresa pretendia desenvolver materiais estáveis quando sujeitos a ambientes húmidos. Se por um lado é reconhecida à Universidade de Reading a capacidade de desenvolvimento na área do processamento e caracterização de polímeros, a verdade é que os processos de processamento disponíveis não permitiram resolver esses problemas. Assim surge a VMAP, com capacidade de reposta na resolução destes problemas, reconhecidos por estas duas entidades. Apesar do seu sucesso, com o passar do tempo surgiu outra necessidade. As cargas deveriam ser adicionadas ao material polimérico apenas no decorrer do processamento e não previamente num dos

componentes, como é proposto pela VMAP. Esta situação está relacionada com a perda de propriedades das cargas, provocada pelo contacto prolongado das cargas com poliol.

Como é objectivo deste trabalho desenvolver um protótipo de um equipamento para o processamento de materiais poliméricos com cargas, houve necessidade de utilizar um procedimento metodológico, como o indicado na Figura 32.

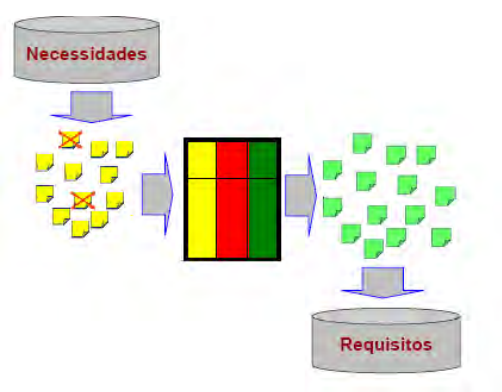


Figura 32 Metodologia para encontrar os requisitos do produto (Completo 2008)

No levantamento das necessidades foi utilizado o método da entrevista. O recurso ao método da entrevista permitiu conhecer as necessidades descritas anteriormente, que resumidamente são:

- Processar termoendurecíveis com cargas de forma mecânica e não manual;
- Adicionar cargas durante o processo de processamento;
- Permitir a utilização de diferentes fracções volúmicas de cargas orgânicas e inorgânicas
- Capacidade de injeção destes materiais;
- Processamento contínuo, possível de ser utilizado industrialmente com base nas necessidades descritas.

Com bases nas necessidades descritas, foram estabelecidos os vários requisitos para o desenvolvimento do equipamento.

Os requisitos considerados no desenvolvimento deste equipamento foram os seguintes:

- Processar materiais termoendurecíveis com elevadas fracções volúmicas de cargas;
- Sistemas independentes para bombear de forma doseada dois componentes distintos, na fase líquida, e capacidade para controlar a temperatura, dos dois materiais;
- Capacidade de armazenamento dos materiais a processar em atmosfera inerte;
- Equipamento móvel e com dimensões adequadas para laboratório;
- Versatilidade no processamento de vários materiais diferentes;
- Capacidade para processar de forma contínua;
- Capacidade para processar materiais com cargas, materiais termoplásticos provenientes da reciclagem doméstica e industrial;
- Adição de cargas apenas no decorrer do processamento;
- Processamento ecológico, utilizando poucos ou nenhuns dissolventes;
- Controlo de processamento simplificado.

Com base na análise destes requisitos, foram esboçadas soluções para responder a estas necessidades, de forma inteligente e eficiente.

3.3 Sistema Mixfill

A solução encontrada passa pelo projecto de uma extrusora operando como reactor de polimerização, com capacidade de misturar e processar cargas em elevada fracção volúmica. E ainda, um sistema para bombear e dosear dois componentes constituintes de um material polimérico termoendurecível, de forma independente, que utilizam a mesma unidade motora. Este equipamento permite, também alterar a relação de transmissão, e consequentemente a razão da mistura dos componentes do material termoendurecível.

Na Figura 33 é apresentado um primeiro esboço desenvolvidos com base na análise dos requisitos relativos ao processamento de materiais termoendurecíveis com elevadas fracções volúmicas de cargas.

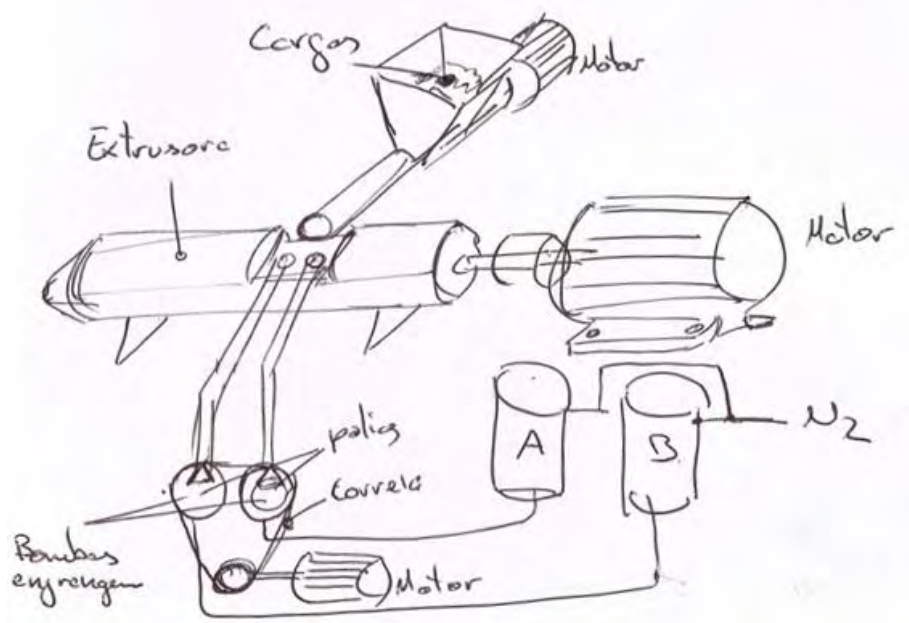


Figura 33 Esboço do equipamento MixFill

Na Figura 34, pode-se observar o princípio de funcionamento de uma extrusora de duplo fuso engrenado em co-rotação, com sistema de alimentação de cargas a ser garantida por meio de um fuso transportador. Na figura pode-se também, observar os dois circuitos de transporte e dosagem dos dois constituintes do material polimérico a processar (A e B). Cada um destes circuitos é operado com bomba independente, o que vai permitir ter caudais diferentes.

O equipamento de processamento dispõe de um sistema de controlo de temperatura, o que vai permitir controlar a temperatura na extrusora em duas zonas, e ainda controlar este parâmetro nos depósitos de armazenamento dos componentes A e B, representados na Figura 33.

Os depósitos de armazenamento são pressurizados com uma atmosfera inerte, de forma a não existir contacto com o ar ambiente deste modo não haver degradação do material.

Foi concebido o seguinte esquema de princípio, Figura 34.

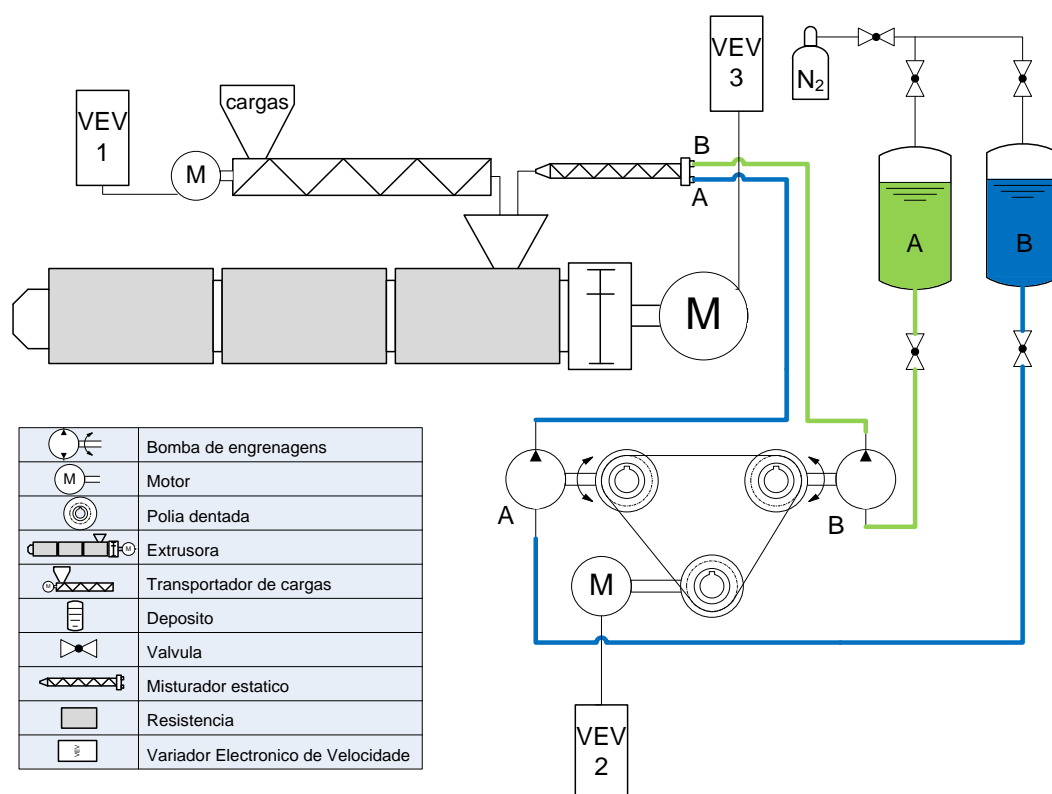


Figura 34 Esquema do princípio de funcionamento da extrusora de duplo fuso MixFill

O modelo CAD, que resultou de um extenso trabalho de alterações relacionadas com opções de projecto, é apresentado na Figura 35.

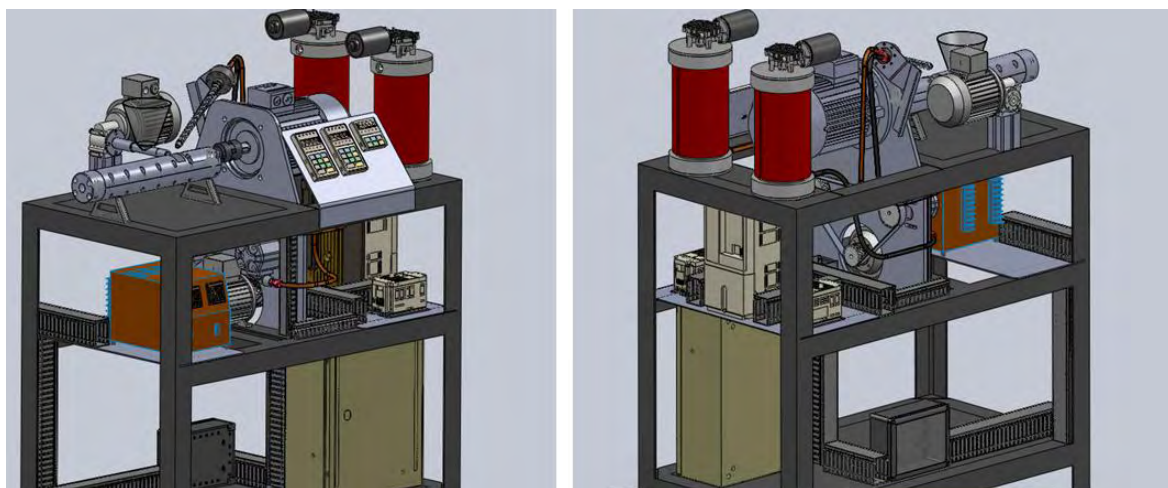


Figura 35 Desenho em CAD 3D da extrusora de duplo fuso desenvolvida (MixFill)

Na Figura 36 são apresentadas, imagens do protótipo funcional da MixFill, montada numa estrutura móvel.

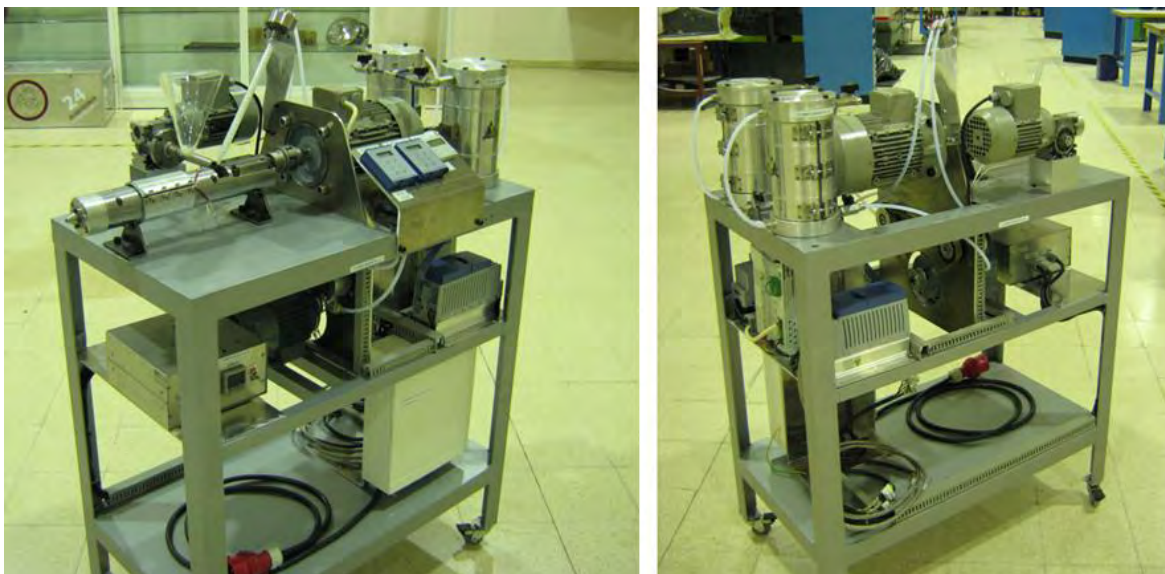


Figura 36 Protótipo MixFill desenvolvido e fabricado para o processamento de materiais poliméricos com elevadas fracções volúmicas de cargas.

3.4 Extrusora MixFill

A solução encontrada foi uma extrusora que aparece para responder essencialmente à necessidade de processar materiais com elevado teor de cargas ou seja, materiais com viscosidades elevadas. Geralmente, para viscosidades elevadas, é comum serem utilizadas extrusoras para o processamento desses materiais, de acordo com o que foi possível verificar na bibliografia consultada.

No estudo efectuado sobre extrusoras, aparece em evidência a extrusora de duplo fuso engrenado em co-rotação, sobretudo pelas características de capacidade de transporte independente da viscosidade do material, aspecto muito importante quando se trata de um processo reactivo, em que esta propriedade varia ao longo do tempo e ainda pela sua capacidade de auto limpeza. Esta última, soluciona um enorme problema quando se trata de um processo reactivo de um material termoendurecível em que, caso fiquem resíduos de material a reagir dentro do reactor, implicará um elevado investimento de mão-de-obra na manutenção.

É neste capítulo que são tomadas decisões relativas às várias opções do projecto do equipamento. No projecto do equipamento de processamento houve naturalmente,

alguma falta de informação objectiva para dimensionar a extrusora de fuso duplo engrenado co-rotativo. Uma outra dificuldade foi a escassa informação relativa a valores de viscosidade para materiais poliméricos durante a sua reacção de polimerização. Esta propriedade varia com o tempo e também com as cargas que serão adicionadas. Tudo isto cria uma incógnita quando se trata de encontrar um valor limite de viscosidade.

Com base na análise da informação recolhida (Capítulo 2) relativa a extrusoras de duplo fuso co-rotativas, produzidas para o processamento de materiais poliméricos foi possível definir alguns parâmetros essenciais para o desenvolvimento e fabrico da extrusora.

Tabela 1 Características de equipamentos para extrusão

Características	L/D	De [mm]	[rpm]	[kg/h]	[kW]
Leistritz	24/1	30	48	10	3,5
Schloemann	6,5/1	47	27	20	2,2
Bcusano	10/1	25	30	6	0,7
MixFill	15/1	20,4	40-... ¹	16-... ¹	1,1-... ¹

É de notar que o valor da velocidade de rotação dos fusos é mais elevado no equipamento MixFill que nas restantes. No entanto, a tendência geral é a de processar com maiores velocidades de rotação, assegurando uma mistura mais homogénea e uma maior taxa de processamento de material, (Figura 37).

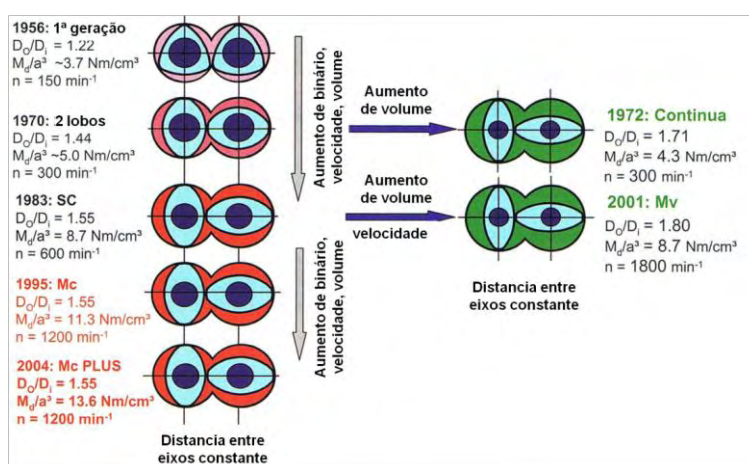


Figura 37 Evolução das características das extrusoras de duplo fuso engrenado da ZSK (Kohlgruber 2008)

¹ Valores obtidos por processo de cálculo. A utilização de variadores electrónicos permite avaliar o desempenho do equipamento numa gama de velocidades.

Com base na informação recolhida na revisão bibliográfica, foi possível desenhar a extrusora, tendo em conta algumas regras geométricas necessárias ao correcto engrenamento dos fusos, considerações de projecto mecânico, selecção de materiais e processos de fabrico.

Segundo Janssen 2007, o flanco e a geometria do canal das extrusoras de duplo fuso engrenado em co-rotação, podem ser determinados com base no diâmetro do fuso, distância entre eixos, ângulo da hélice e número de lobos. Com base nestes valores e princípios cinemáticos, é possível descrever toda a geometria do fuso em detalhe, Figura 38.

A distância entre eixos pode ser determinada pela seguinte equação:

$$L_c = D \cos\left(\frac{\pi}{2p} - \frac{\alpha_t}{2}\right)$$

Em que:

α_t - ângulo de ponta;

α_i - ângulo de engrenamento;

p - numero de lobos;

D - diâmetro do fuso;

L_c - distância entre eixos;

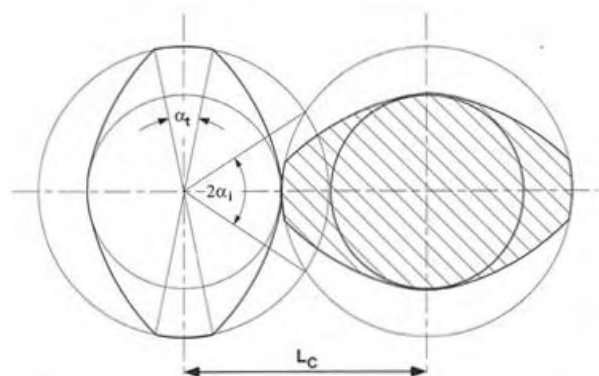


Figura 38 Geometria da extrusora de duplo fuso com auto-limpeza (Janssen 2007)

O ângulo de engrenamento α_i está relacionado com o ângulo de ponta da seguinte forma:

$$\alpha_i = \frac{\pi}{2p} - \frac{\alpha_t}{2}$$

Assim a distância entre eixo poder ser expressa por:

$$L_c = D \cos \alpha_i$$

A profundidade máxima do canal na raiz do fuso é dada por:

$$H_{max} = D - L_c = D - D \cos \left(\frac{\pi}{2p} - \frac{\alpha_t}{2} \right)$$

Considerando um diâmetro $D = 20,4$ mm, número de lobos $p=2$ e geometricamente, por aproximação um ângulo de ponta $\alpha_t = 17,4^\circ$ aplicando as formulas anteriores obtém-se, $\alpha_i = 39,15^\circ$, $L_c = 15,82$ mm e uma profundidade de canal máxima na raiz do fuso de $H_{max}=4,49$ mm.

A partir destes valores, foi possível passar à fase de desenho dos fusos. A construção da geometria dos fusos, Figura 39, pode ser obtida considerando os seguintes passos:

1. Desenhar a linha AB, sendo esta igual á distância entre eixos calculada;
2. Localizar o ponto D, de forma a que o ângulo COD seja igual a π/p ;
3. O ponto P é localizado a meio do círculo entre B e D;
4. PD igual a QD, que define a ponta do fuso; a outra ponta será Q'D' ;
5. Centrar M_p na linha do flanco desde P a uma distância L_c ;
6. Construir a curva de flanco PR e seguidamente construir as restantes linhas de flanco;
7. Assim a secção de um fuso está concluída.

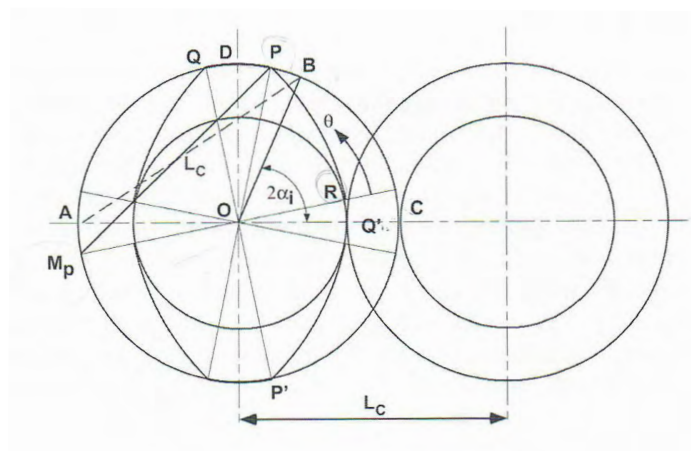


Figura 39 Construção da Geometria dos fusos de uma extrusora de duplo fuso em auto-limpeza (Janssen 2007)

O passo do fuso que é inicialmente de 40 mm varia de forma linear até aos 20 mm. Em teoria isto permite que a densidade de material possa duplicar desde a zona de alimentação até ao bico de injeção. O corpo da extrusora foi pensado para ter forma cilíndrica para se poder montar resistências eléctricas em banda. O corpo da extrusora, onde estão montados os fusos, está dividido a meio para se ter um acesso mais fácil para manutenção. Como se trata de um protótipo é de supor que ocorram problemas de manutenção, o que implica a sua abertura.

Com recurso ao software Solidworks, foi realizado o trabalho de modelação da extrusora. Na Figura 40 pode-se observar a metade inferior do corpo da extrusora com os dois fusos montados lado a lado.

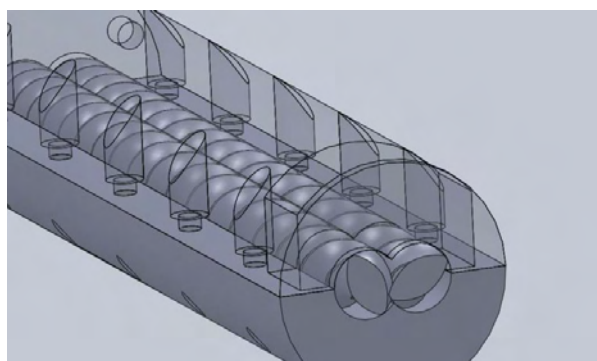


Figura 40 Corpo e fusos da extrusora desenvolvida

A alimentação do material a processar foi pensada apenas com uma abertura na parte superior do corpo, de forma a ser possível visualizar a evolução do processamento. Deste modo é possível ajustar a velocidade de rotação dos fusos em função de outros parâmetros do processamento. A partir dos desenhos, do corpo da extrusora e dos fusos, foi subcontratado o trabalho de maquinação destas peças.

Os fusos foram maquinados num centro CNC de 4 eixos, a partir de aço inox calibrado de 20 mm. As superfícies dos fusos, em algumas zonas, tiveram que ter um acabamento manual, consequência dos defeitos gerados na maquinação originados pela sua elevada esbeltez, situação que se sabia poder ocorrer. No entanto, optou-se por correr o risco e manter a relação L/D, de modo a ter mais garantias de eficácia no processamento do material.



Figura 41 Superfícies dos fusos com problemas de acabamento superficial

Os fusos têm exactamente a mesma geometria, ou seja são em tudo idênticos, sendo no entanto montados no corpo da extrusora desfasados 90°. As engrenagens maquinadas, nas extremidades dos fusos, foram desenhadas considerando o desfasamento de 90° dos fusos.

Na Figura 42 pode-se observar os dois fusos montados na metade inferior do corpo, da extrusora.



Figura 42 Fusos montados no corpo da extrusora, com chumaceiras e rolamentos axiais.

Os fusos foram analisados do ponto de vista dimensional e estrutural, com recurso ao software COSMOSWorks, com o objectivo de analisar possíveis interferências geométricas e minimizar eventuais zonas de concentração de tensões. A análise estrutural teve como objectivo avaliar as tensões máximas desenvolvidas nos fusos e, com base nos materiais seleccionados para estes componentes, avaliar o seu dimensionamento. Consequentemente foi desenvolvida uma análise por elementos finitos, em que se pretendeu simular o caso mais crítico, situação em que os fusos bloqueiam com material solidificado e o motor eléctrico em funcionamento. Na formulação do problema, foram restringidos todos os graus de liberdade na ponta do fuso (extremidade do fuso a jusante da zona de alimentação do material a processar), permitindo apenas velocidade de rotação nos apoios das chumaceiras. Nesta análise foram, naturalmente, consideradas as características do motor e relações de transmissão.

Na figura 43 e 44 são apresentados os resultados da análise por elementos finitos. Resulta da análise destes resultados que os fusos têm condições de resistência mecânica.

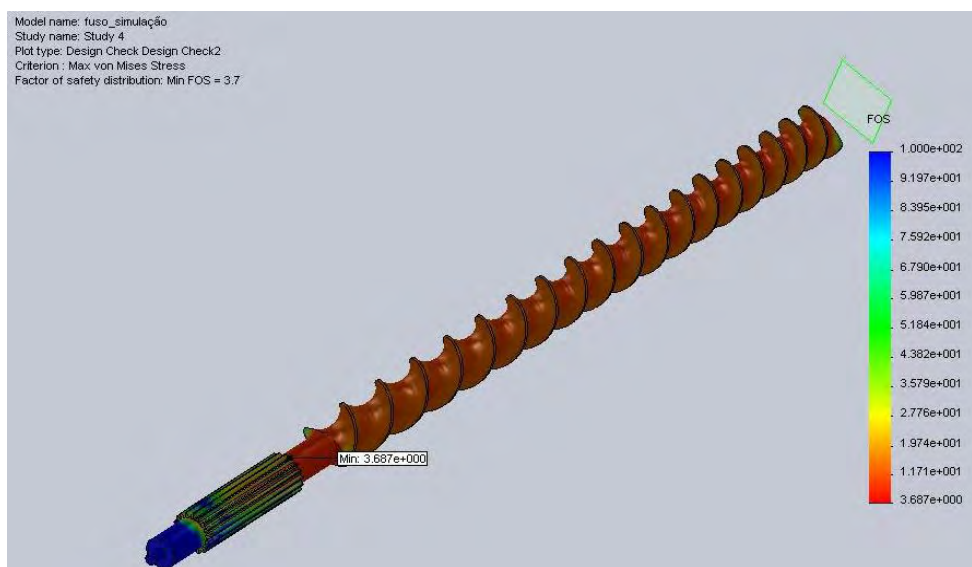


Figura 43 Distribuição do factor de segurança para a situação crítica considerada (bloqueio dos fusos com material solidificado).

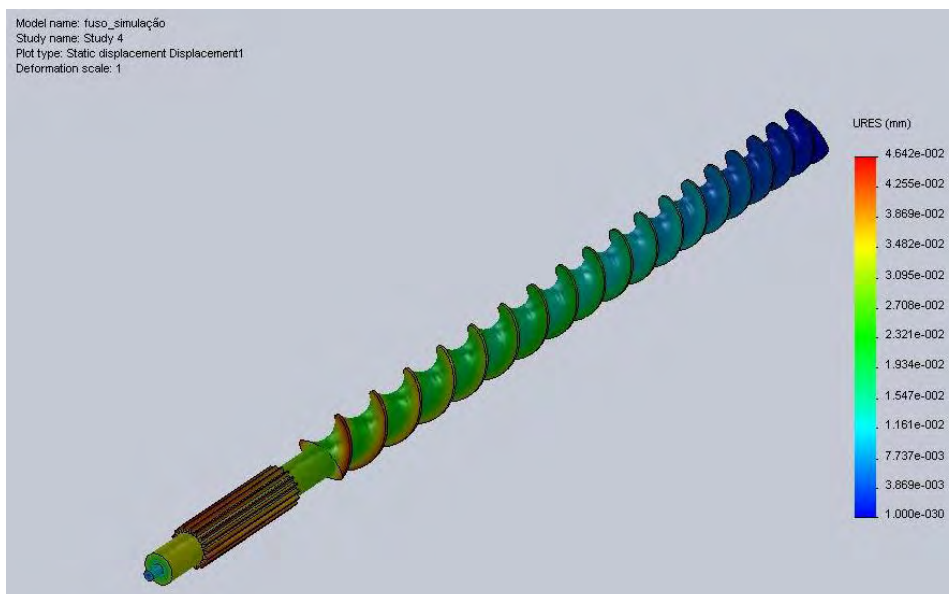


Figura 44 Distribuição de deslocamentos para a situação crítica considerada (bloqueio dos fusos com material solidificado)

No dimensionamento do sistema de transmissão de potência entre o motor e os fusos foram encontradas algumas dificuldades de ordem construtiva. A opção de dimensionar a engrenagem para acoplar por enchavetamento nos fusos, foi abandonada por poder comprometer a integridade dos fusos. Consequentemente, a opção foi a de maquinar, na extremidade oposta à saída do material a processar, a engrenagem. O módulo considerado para as engrenagens foi de 0,75mm.

Como os dois fusos têm de rodar no mesmo sentido, foi considerado existir uma terceira engrenagem, maquinada no veio, que recebe a potência do motor. Engrenagem essa que engrena nas duas engrenagens dos dois fusos. Esta solução construtiva é apresentada na figura 45.

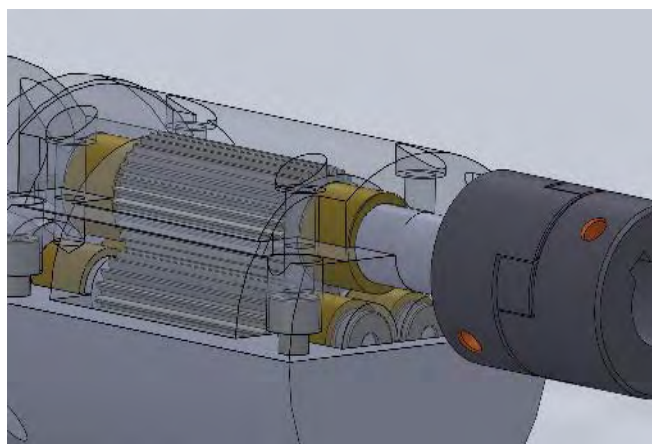


Figura 45 Pormenor do sistema de transmissão

As engrenagens foram dimensionadas, considerando o binário máximo e as propriedades do material seleccionado para o fabrico dos fusos, assim a largura da engrenagem foi de 50mm. O dimensionamento efectuado foi realizado com base no software disponibilizado pela Tribology-ABC, de acordo com a figura 45.

	pinion	wheel
number of teeth $z \geq 12$	18	31
profile shift coeff. $x=V/m_n= 0...0.5$	0.5	0.418
E-modulus	206 GPa	206 GPa
module m	0.75	mm
pressure angle α	20	deg.
face width b	50	mm
contact stress $\sigma_{H \text{ lim}}$ (Tabel 4.6)	1200	MPa
factor $\sigma_{HP} / \sigma_{H \text{ lim}} = (Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_X) / S_H$	0.92	
factor $\sigma_H / \sigma_{H0} = (K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha})^{1/2}$	1.6	
Solve Reset Print		
diameter $d=m \cdot z$	13.5 mm	23.25 mm
diameter base circle $d_b=m \cdot z \cdot \cos(\alpha)$	12.68585 mm	21.84785 mm
diameter roll circle d_w	13.95582 mm	24.03503 mm
transmission ratio $i=z_2/z_1$, gear down $i>1$	1.722222	
center distance a	19	mm
geometry factor Z_H	2.222540	
elasticity factor Z_E	189.8117	MPa ^{1/2}
contact ratio ϵ_α	1.447503	
contact ratio factor Z_ϵ	0.922405	
permissible contact stress σ_{HP}	1.104	GPa
Roll pressure angle α_w	24.6	deg.
Tangential force $F_{t \text{ max}}$	1.342698	kN
Maximum drive torque $T_{\text{max},1}$	9.369233	Nm

Figura 46 Folha de cálculo para dimensionamento das engrenagens

Para apoio dos fusos e veio de potência, foram consideradas chumaceiras constituídas por casquilhos de bronze. Nas extremidades dos fusos foram, montados rolamentos axiais (figura 47), de forma a suportarem os esforços axiais destes.

Na Figura 47 podem-se observar os vários componentes que constituem o sistema de extrusão.

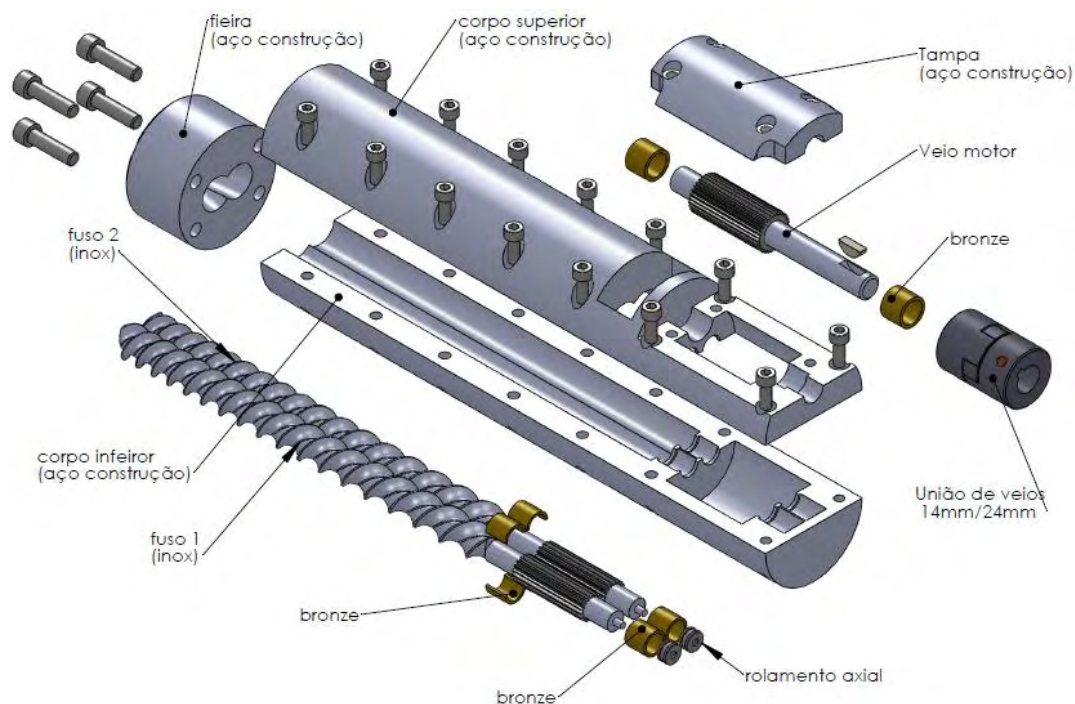


Figura 47 Pormenores do sistema mecânico de processamento da extrusora MixFill.

Foi, naturalmente, a partir do trabalho de modelação CAD (figura 47), que foram elaborados os vários desenhos para o fabrico dos componentes utilizando processos de maquinação por torneamento, fresagem convencional e fresagem CNC.

Na Figura 48 pode-se observar os vários componentes maquinados do sistema mecânico de processamento da extrusora MixFill.



Figura 48 Sistema mecânico do processamento da extrusora MixFill: componentes maquinados.

3.5 Sistema de bombagem dos dois componentes poliméricos

Com base no estudo de sistemas para o transporte de materiais de termoendurecíveis, verificou-se que um dos sistemas mais usados é a bomba de engrenagens, cujo sistema de transmissão é por acoplamento magnético, o que minimiza o risco de contaminação. Esta solução era interessante, respondia ao que se pretendia mas, era demasiada cara. A bomba de acoplamento magnético teria um custo de cerca de 3000€, o que se iria traduzir, só em bombas, em cerca de 6000€. Esta solução não foi considerada.

Consequentemente a solução passou por seleccionar uma bomba hidráulica. Esta foi seleccionada apenas com base no caudal a bombear, através do circuito dimensionado para o efeito, até ao misturador estático. A bomba seleccionada foi uma Marzocchi GHP1-D-2, que é uma bomba hidráulica de alta pressão, uma vez que o fornecedor não dispunha da bomba equivalente de média pressão para entrega. As características gerais da bomba são as indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 Principais características da bomba GHP1-D-2

Bomba	Caudal [cm ³ /ver.]	Caudal a 1500 rpm [l/min]	Pressão máxima [bar]	Rotação máxima [rpm]
GHP1-D-2	1,4	2,0	310	6000

Contudo, existe um problema com esta bomba seleccionada. Esta, apesar de ser a de menor caudal disponível, tem um caudal acima do pretendido. No entanto, o sistema de controlo permite seleccionar velocidades de rotação relativamente baixas. Contudo, para um gama de rotações abaixo de 800 rpm, o fabricante não garante o caudal versus pressão. Se o problema for apenas o da pressão não ser garantida, isto não será grave. Se por outro lado o caudal for colocado em causa, o problema pode tomar dimensões preocupantes. Assim, é evidente que esta situação pode acarretar dificuldades de processamento. Consequentemente, o dimensionamento do sistema de bombagem é

uma tarefa extremamente importante quando se pretende ter rigor nos volumes do material a processar.

Durante o trabalho de pesquisa bibliográfica, foi possível encontrar problemas semelhantes encontrados por outros investigadores que trabalharam na mesma área. Um outro problema prende-se com problemas de utilização de vedantes. Este problema é particularmente importante, no caso do transporte por bomba de engrenagens, de produtos químicos que ataquem o material dos vedantes. Os vedantes, que vêm montados de fábrica, podem não ser os mais adequados para contactar com os materiais a processar. Deste modo foi adquirido e instalado um kit de vedantes do tipo “Viton” para se proceder a essa alteração, Figura 49.



Figura 49 Imagem da aplicação do kit de vedantes em “viton”

O motor eléctrico utilizado para este sistema não foi seleccionado, apenas foi verificado que a potência de 0,37 kW (SEW – DT71D4/NV16) existente no laboratório seria suficiente. A ideia de utilizar apenas um motor eléctrico para as duas bombas de engrenagens foi considerada por razões de custo. Com a utilização de um motor eléctrico, para transmitir potência às bombas foi necessário utilizar um sistema de transmissão por correia dentada e três polias dentadas como mostra a Figura 50. A razão de mistura dos dois componentes do material termoendurecível a ser considerado, pode ser alterada variando o número de dentes das polias das bombas.

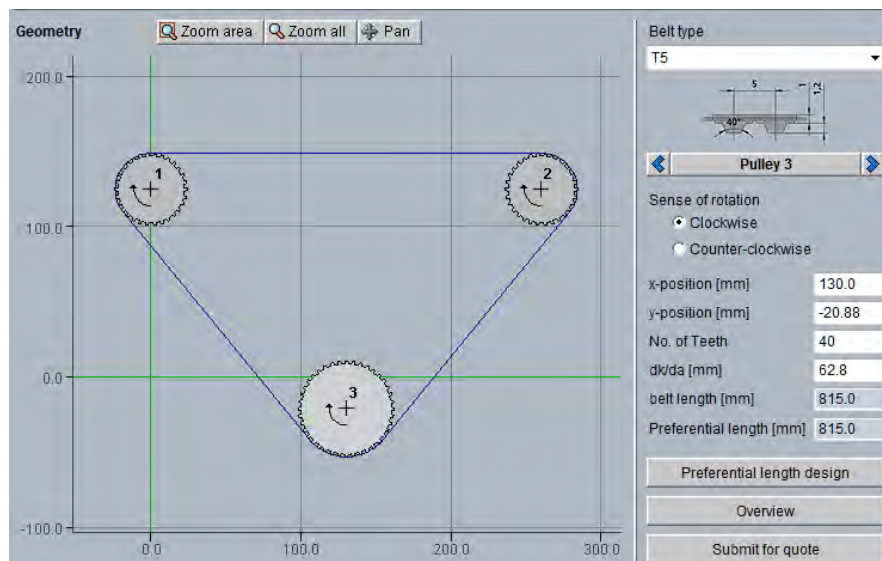


Figura 50 Imagem do programa de dimensionamento das correias dentadas e de polias

Para seleccionar uma correia de forma correcta foi utilizado o programa de cálculo da BRECOflex CO., L.L.C versão 3.21 (Figura 50). Com base nas características do sistema de motorização o factor de segurança que resultou deste dimensionamento foi de 1,23.

É de referir, que no desenvolvimento de todos os sistemas, foi utilizado o software Solidworks para obter desenhos para o fabrico e maquinação dos vários componentes (fresagem convencional e fresagem CNC). Na Figura 51 pode-se observar o sistema de bombagem dos dois componentes de material termoendurecível, bem como o sistema de armazenamento dos dois materiais a processar.

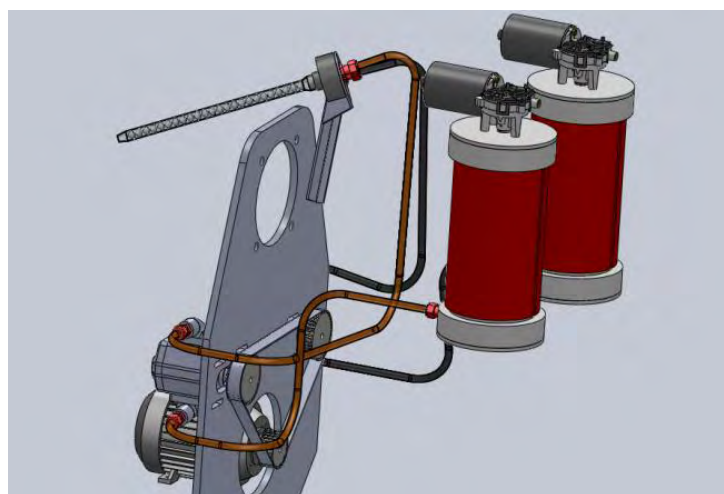


Figura 51 Desenho do sistema de bombagem e sistema de armazenamento

Os depósitos de armazenamento dos dois componentes foram fabricados em alumínio e preparados para receberem resistências eléctricas, com o objectivo de poder ser individualmente controlada a temperatura dos dois componentes. É assim possível controlar a velocidade de reacção, que se inicia no misturado estático e ainda controlar a viscosidade dos materiais a processar. Estes depósitos de armazenamento têm uma entrada para o azoto para ser possível criar uma atmosfera inerte e assim evitar algumas reacções indesejáveis. Estas situações podem levar à cristalização do material e, deste modo, interromper o fluxo de material a processar.

No projecto dos depósitos de armazenamento, foi considerado estes terem um sistema motorizado individual de homogeneização para que não se criem sedimentos no fundo dos depósitos. Estes sistemas, serão posteriormente montados quando os materiais a processar assim os exigirem.

As tubagens utilizadas para o transporte dos materiais, dos depósitos de armazenamento para as bombas e das bombas para o misturados estático, são flexíveis transparentes e de engate rápido. O facto da tubagem ser transparente prende-se com a necessidade de visualizar o fluxo dos dois materiais (Figura 52).

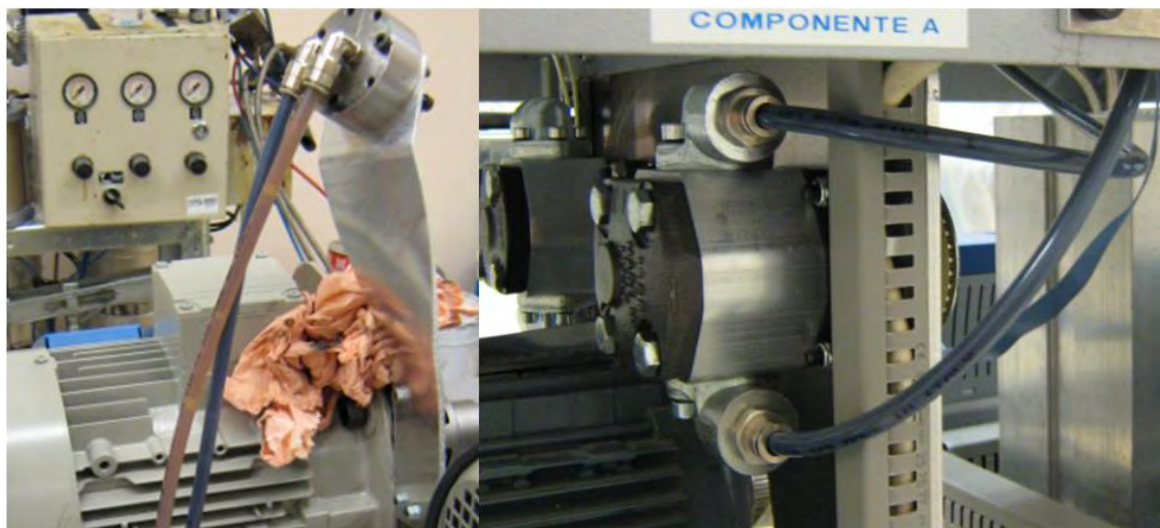


Figura 52 Circuito do sistema de bombagem

3.6 Sistema de controlo da extrusora MixFill

O objectivo pretendido para o sistema de controlo da extrusora MixFill era o de conseguir um sistema o mais flexível possível, ou seja, poder variar os principais parâmetros de processamento numa gama de valores alargada. Os principais parâmetros que nos interessam controlar são a velocidade de rotação dos fusos da extrusora, o caudal das bombas, a velocidade de rotação do fuso do sistema de transporte das cargas, temperaturas do sistema de processamento, e temperaturas dos reservatórios do material a processar.

Na solução do tipo de motores eléctricos foi equacionado estes serem motores de passo ou servomotores, para controlar qualquer um dos subsistemas. Os motores de passo eram a escolha certa para o controlo rigoroso de velocidades de rotação e, consequentemente os caudais, mas a falta de binário neste tipo de motores e a necessidade de se utilizar um computador para o controlo, bem como os elevados custos com a aquisição de motores deste tipo com binários mais elevados, remeteram esta solução para mais tarde.

Os servomotores são muito usados em centros de maquinação e máquinas em que a posição do sistema a movimentar é extremamente importante. A opção com servomotores talvez seja a solução mais interessante a considerar para a extrusora MixFill, mas a falta de formação para realizar o controlo destes mecanismos absorveria muito tempo o que iria colocar em causa o principal objectivo deste trabalho (realização de um protótipo experimental). Por outro lado, uma solução com motores AC assíncronos controlados por variadores electrónicos de velocidade (VEV), também é uma opção interessante e revelou ser eficiente, Figura 53.



Figura 53 Displays de controlo dos 3 VEV, colocados numa zona ergonómicamente correcta.

O controlo do sistema considerado é realizado através da frequência e tensão colocada nos motores, o que pode garantir uma variação quase linear da velocidade de rotação. Com esta solução, motor AC normal e variador electrónico de velocidade, consegue-se ter um sistema de velocidade controlada. Existe algum escorregamento devido ao desvio da velocidade de rotação em relação à velocidade de sincronismo causada pelo binário imposto no motor que pode ser compensado com programação nos VEV, bem como a corrente máxima entregue ao motor e assim, controlar o binário máximo exercido por este. Por si só, isto evita o uso de uma embraiagem no acoplamento do motor à extrusora.

Valores de 3 a 8 % de escorregamento podem facilmente ocorrer, ou seja de desvio da velocidade real para a calculada a partir da frequência imposta ao motor. Logo, é necessário conhecer este desvio, algo que se pode fazer usando um tacómetro óptico e, assim que se conhecer este valor compensá-lo a partir da programação do VEV.

Para controlar a temperatura, foi pensado um sistema de controlo para 5 zonas, duas nos depósitos de materiais a processar e 3 em zonas distintas do corpo da extrusora. As resistências são construídas por medida a fim de se ajustarem na perfeição às várias geometrias envolvidas (Corpos dos depósitos de armazenamento e corte da extrusora). Cada uma tem instalado um termopar do tipo J para o controlo da temperatura.

O sistema PID para o controlado de temperaturas (em cinco zonas) foi fornecido por empresas especializadas.

No projecto eléctrico, procurou-se criar mecanismos de protecção do operador e, também proteger os motores e outros componentes eléctricos contra sobrecargas.

A alimentação eléctrica é trifásica (380V-50Hz), dispõe de um quadro eléctrico, composto por disjuntores e dispositivos de protecção.

Na Figura 54 está representado um esquema dos circuitos eléctricos e quadro eléctrico.

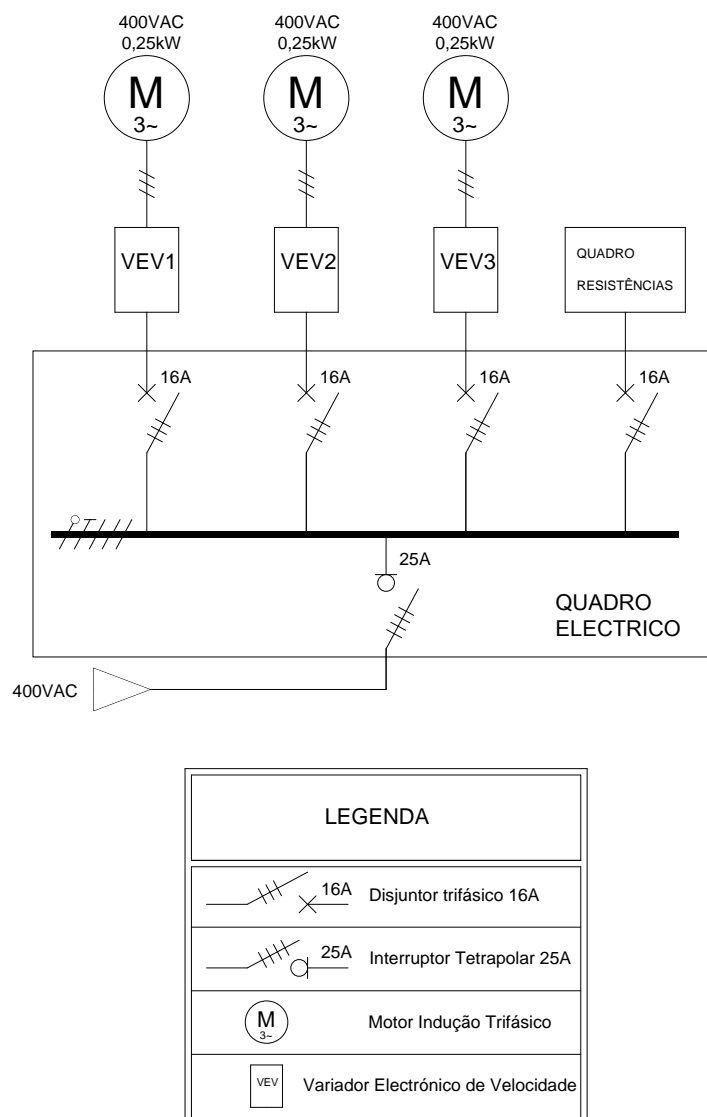


Figura 54 Esquema eléctrico da MixFill

Na Figura 55 pode-se observar o quadro eléctrico da MixFill, sua localização e pormenores dos sistemas de protecção e segurança.



Figura 55 Quadro eléctrico da extrusora MixFill

Capítulo 4 **Resultados Experimentais**

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados na avaliação de desempenho da extrusora MixFill, relativamente ao processamento de materiais poliméricos com cargas.

Os materiais processados são materiais compósitos de matriz termoendurecível com cargas orgânicas e cargas de material termoplástico, proveniente da reciclagem doméstica e industrial. Foram processados materiais com fracções volúmicas que, variaram entre os 20% e os 70% em volume de cargas.

4.2 Avaliação do desempenho da extrusora MixFill

Após a conclusão do desenvolvimento e fabrico da extrusora MixFill, é necessário avaliar o desempenho do equipamento.

A avaliação do desempenho começou, naturalmente, pela avaliação dos subsistemas e sistemas da extrusora MixFill. Foram realizados testes de estanquidade do circuito do sistema de bombagem. O sistema foi pressurizado a 3 bar cerca de uma hora. A pressão manteve-se inalterada, o que permitiu avaliar positivamente o sistema de bombagem em termos de estanquidade.

Em seguida, foi verificada toda a instalação eléctrica, disjuntores do quadro, variadores de frequência (VEV) e motores eléctricos. A configuração dos VEV exigiu algum investimento de tempo, pois são utilizados dois tipos de equipamentos. O conhecimento das formas de programação do software para poder parametrizar, frequências máximas e mínimas, definir intensidade de corrente máxima, definir rampas de aceleração e desaceleração, e impor a temperatura máxima de funcionamento nestes equipamentos, exigiu tempo e dedicação.

O controlador de temperatura, assim que foi ligado funcionou sem qualquer problema. De ressaltar que apesar de inicialmente a MixFill ser projectada para ter três resistências no sistema de processamento, apenas uma foi instalada, uma vez que o que

se pretendia era conhecer o equipamento e evitar o risco de se ter uma reacção demasiado rápida do material utilizado no processamento.

Com todos os sistemas a funcionar sem problemas, estavam reunidas as condições para se iniciar o arranque da extrusora MixFill, com o processamento de dois materiais, termoendurecíveis com adição de cargas.

Para estabelecer a frequência de funcionamento para cada motor, foi elaborada uma folha de cálculo (Figura 56), onde o operador apenas define os caudais para cada sistema, isto é, o caudal de cada componente do material termoendurecível, das cargas e dos produtos de reacção. Com base no caudal das bombas, na desmultiplicação do sistema de bombagem e do número de pólos do motor, foi possível fazer um cálculo que permite determinar uma frequência para um determinado caudal de material termoendurecível.

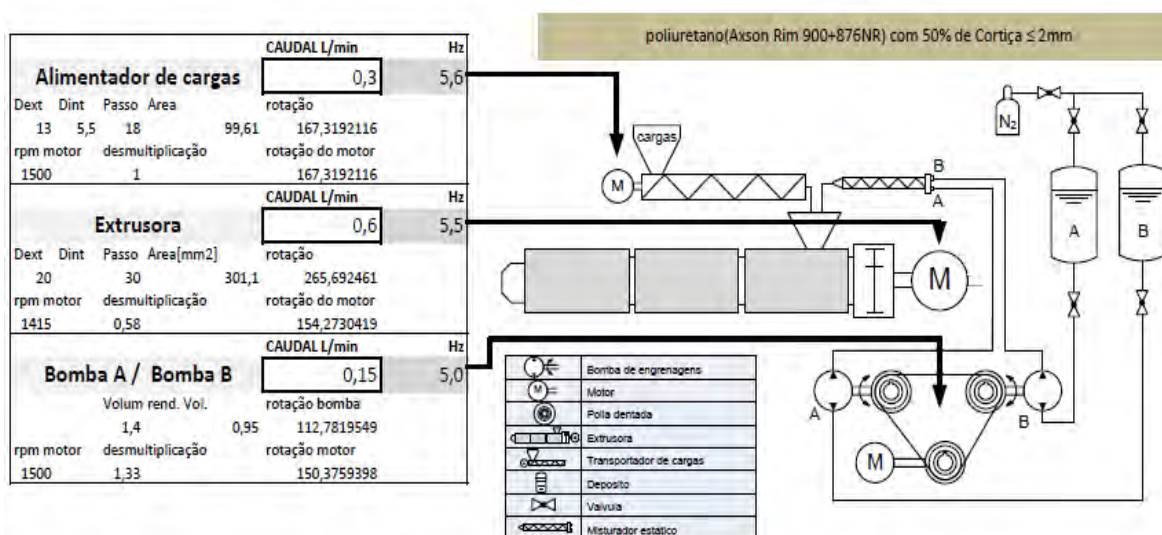


Figura 56 Folha de cálculo para as frequências dos VEV em função dos caudais pretendidos

O mesmo raciocínio foi feito para o sistema de transporte de cargas que funciona com um fuso alimentador. Neste caso, o deslocamento por revolução foi calculado usando a área de secção vazia do fuso, multiplicada pelo valor passo do fuso.

Segundo KOHLGRUBER 2008, o caudal da extrusora depende directamente do material a ser transportado. O ideal seria um material que deslizasse nas paredes do corpo da extrusora sem deformação, neste caso um perfil de passo T e área de secção livre A_{free} poderia transportar um volume V_{slip} :

$$V_{slip} = n T A_{free}$$

Mas como, geralmente, os materiais aderem às paredes, o caudal, considerando ausência de pressão, pode ser estimado da seguinte forma:

$$V_{max} = 0,5 n T A_{free}$$

O processo real tipicamente usa um caudal correspondente de metade do V_{max} ou ainda menos.

$$V_{real} = 0,5 \cdot 0,5 n T A_{free}$$

Foi a partir desta equação, do número de pólos do motor e valor de relação da transmissão da extrusora, que se determinou a frequência necessária para um determinado caudal. A área de secção livre, A_{free} , foi encontrada a partir do modelo CAD da extrusora.

Posto isto, era necessário conhecer a resposta do equipamento aos dados de entrada (caudais) e determinar possíveis erros para poderem ser corrigidos. Recorrendo a um tacómetro óptico foi possível caracterizar as velocidades de rotação versus frequência, dos sistemas de bombagem e alimentação de cargas, Figura 57. Os resultados obtidos permitiram estabelecer curvas de variação da velocidade de rotação versus frequência para cada sistema.



Figura 57 Ensaios de variação da velocidade de rotação versus frequência.

Como se pode ver na Figura 58 e Figura 59 a variação da velocidade de rotação em ambos os sistemas acontece praticamente de forma linear. A partir das curvas obtidas é possível estabelecer a frequência do motor necessária para um determinado caudal.

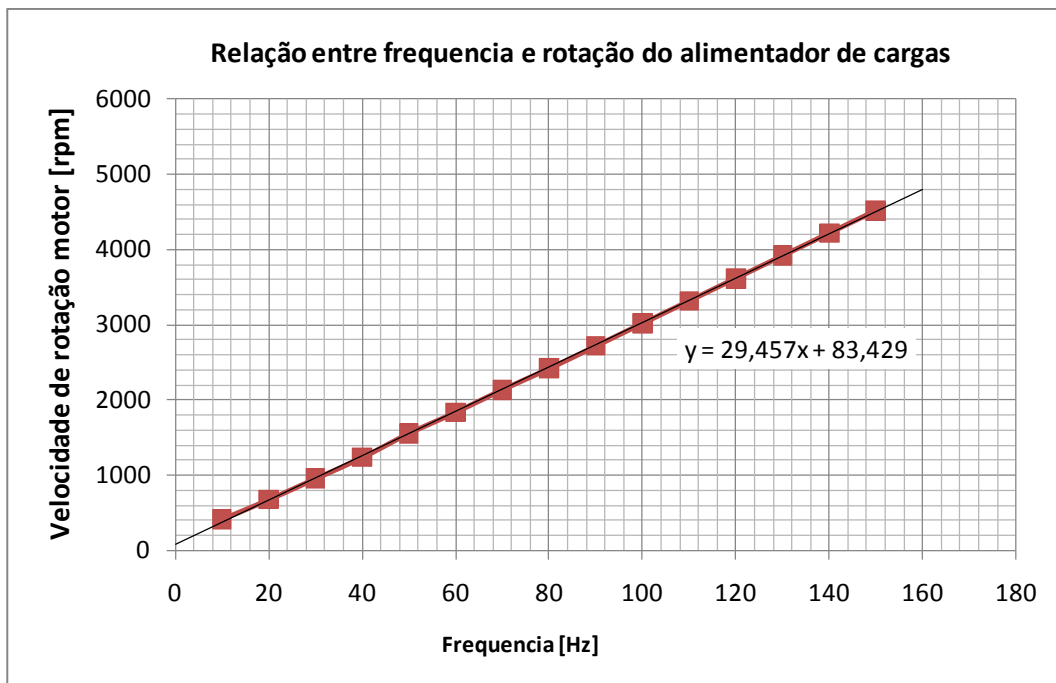


Figura 58 Variação da velocidade de rotação versus frequência para o alimentador de cargas.

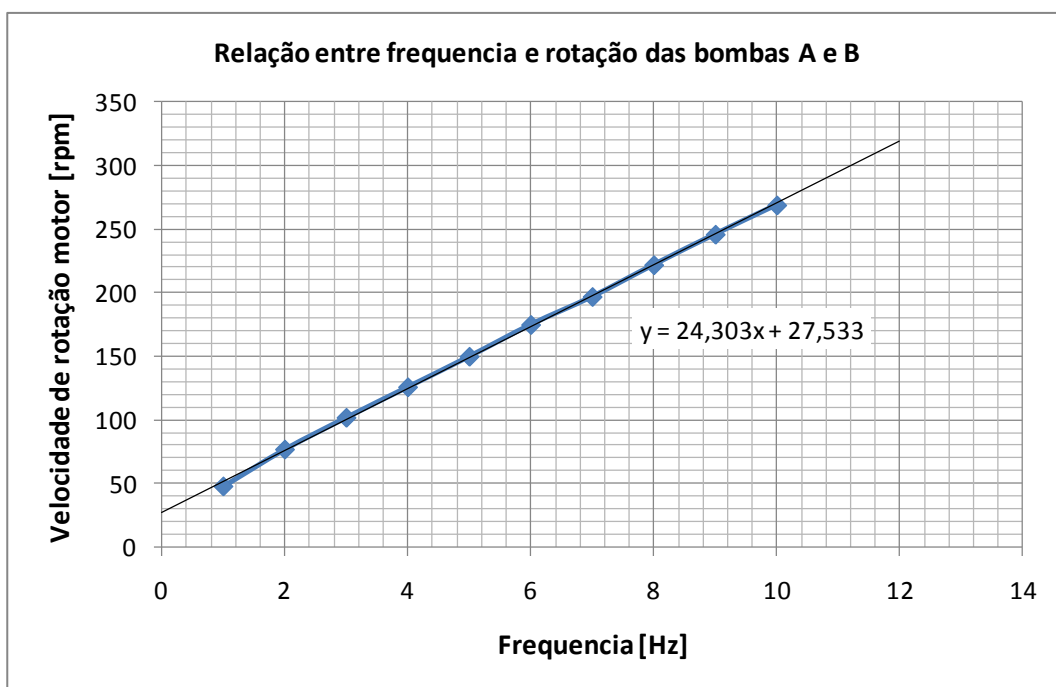


Figura 59 Variação da velocidade de rotação versus frequência para as bombas dos dois componentes do termoendurecível (A e B)

Foram também realizados testes de verificação de caudais. Esta avaliação revelou ser útil pois permitiu que o estabelecimento dos caudais fosse mais preciso. Os testes de avaliação de caudal, consistiram em bombear um material para um recipiente graduado, no intervalo de tempo de 20 segundos. Estes testes revelaram um erro mínimo entre o caudal calculado e o realizado pelo sistema de bombagem. O resultado de um teste para um caudal de 0,15 l/m com um intervalo de tempo de 20 segundos foi a bombagem de cerca de 49,5 ml, Figura 60, o que já revela uma boa configuração dos parâmetros da extrusora MixFill.



Figura 60 Resultado de um teste de caudal ao sistema de bombagem da MixFill

O mesmo tipo de avaliação foi realizada para o sistema transportador de alimentação de cargas, mas neste caso os resultados foram diferentes dos expectáveis. Em relação às velocidades de rotação do fuso alimentador, o sistema tem um bom desempenho. Mas o mesmo não acontece com os resultados em termos de caudal, que ficaram aquém do esperado. Esta situação levou a algumas alterações no sistema transportador de cargas, foi alterada a sua relação de transmissão e, simplificou-se a acessibilidade ao fuso para poderem ser realizados testes de caudal de forma mais expedita (Figura 61).



Figura 61 Alterações efectuadas ao alimentador de cargas (Esq. posição de trabalho; dir. posição de medição de caudal)

Um outro problema prende-se com o sistema de arrefecimento dos motores. Estes são arrefecidos por convecção, por meio de aletas onde através das quais passa ar que é forçado por uma ventoinha ligada ao veio do motor. Ou seja, quanto maior a rotação dos motores maiores são as taxas de arrefecimento. O motor da extrusora trabalha com rotações relativamente baixas e elevadas cargas de binário, o que provoca um sobreaquecimento ao fim de algumas dezenas de minutos. Este é mais um aspecto a ter em conta em futuros trabalhos associados à extrusora MixFill.

A extrusora MixFil revelou ser eficiente, quer no processamento de materiais, quer em termos de acessibilidade para manutenção. Foi possível fazer alguns testes sem que houvesse necessidade de se realizar trabalhos de manutenção, ou seja limpeza da extrusora entre injeções. Pois foi, verificado que após o processamento de material, não ficaram resíduos no sistema de processamento, isto é, todo o material foi expulso. No entanto, houve casos, em que foram encontrados resíduos de material, após o seu processamento, Figura 62. Esta situação é devida ao facto da geometria considerada para o fabrico do fuso, em algumas zonas, não ter sido bem reproduzida (erros de maquinação). Por outro lado, existe a folga considerada, folga entre o fuso e as paredes

do corpo cilíndrico, de 0,2 mm. É usual, considerar valores de 0,1 mm e valores inferiores para a folga entre o fuso e as paredes do corpo.

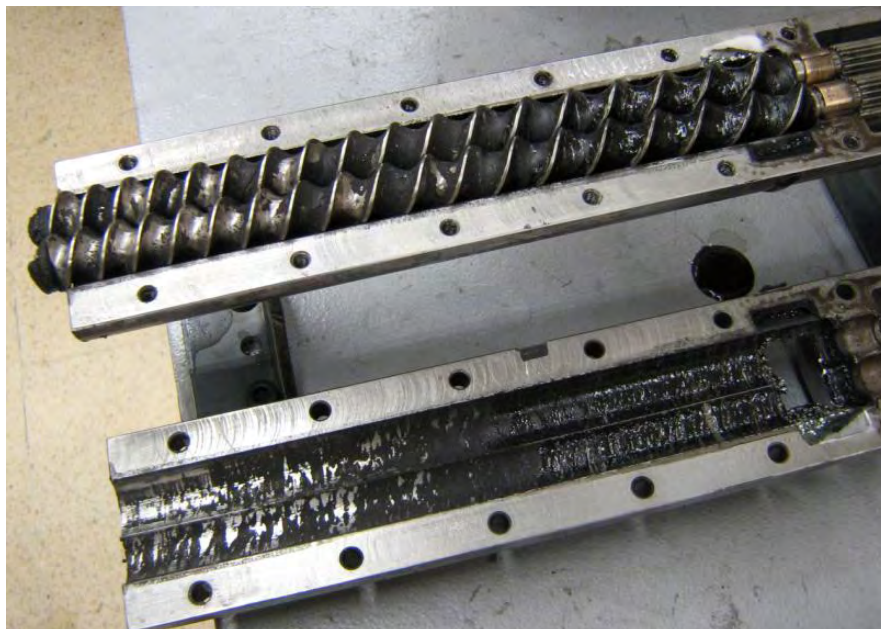


Figura 62 Material agarrado aos canais dos fusos e ao corpo da extrusora

O equipamento foi testado como extrusora, com e sem fieira e como máquina de injeção, tendo sido utilizado um molde de provetes. Em qualquer dos casos funcionou como o que seria expectável.

4.3 Materiais processados e caracterização

Foi processado um conjunto de materiais compósitos de matriz polimérica com cargas. Os materiais foram processados na extrusora MixFill. Estes materiais processados são apresentados na Tabela 3. O material polimérico utilizado é da marca Axson e tem um tempo de “pot life” de 1 minuto.

Os materiais utilizados como cargas foram o pó de pinho, cortiça moída ($\leq 1\text{mm}$), cortiça moída ($\leq 2\text{mm}$) e material termoplástico proveniente de reciclagem doméstica e industrial. Para avaliar o desempenho da MixFill em termos de capacidade de

processamento, foram processados materiais com elevadas fracções volúmicas de cargas sólidas, até um valor máximo de 70% em volume.

Tabela 3 Materiais processados na MixFill e caracterizados

Termoendurecível	Cargas	Fracção volúmica
Rim 900 + 876 NR	Cortiça $\leq 2\text{mm}$	20%
Rim 900 + 876 NR	Cortiça $\leq 2\text{mm}$	50%
Rim 900 + 876 NR	Cortiça $\leq 2\text{mm}$	70%
Rim 900 + 876 NR	Cortiça $\leq 1\text{mm}$	20%
Rim 900 + 876 NR	Pó de pinho	20%
Rim 900 + 876 NR	Alumínio $\leq 3\text{mm}$	10%
Rim 900 + 876 NR	Microesferas de vidro	10%

Os materiais processados foram conformados num molde de silicone de forma a serem facilmente desmoldados. A geometria dos provetes é paralelepípedica e tem as medidas adequadas, aspecto fundamental para as análises de DMA. Foram analisadas macro fotografias dos materiais processados de forma a verificar a sua homogeneidade. Desta análise,

Figura 63, relativa aos vários materiais processados, pode-se afirmar que tem uma homogeneidade relativamente boa. Apesar disso, podem-se observar algumas inclusões de bolhas que podem ser minimizadas.

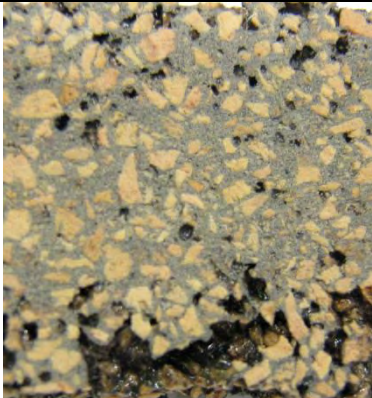

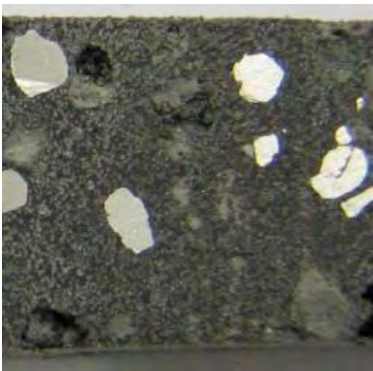






		
Cargas: cortiça $\leq 2\text{mm}$	Poliuretano	Cargas: alumínio $\leq 3\text{mm}$
		
Cargas: pó de pinho	Cargas: cortiça $\leq 1\text{mm}$	Cargas: microesferas de vidro
		
Cargas: termoplástico reciclado	Cargas: cortiça $\leq 2\text{mm}$	Cargas: cortiça $\leq 2\text{mm}$

Figura 63 Fotografias dos vários materiais processados na extrusora MixFill

Foram também determinadas as densidades dos materiais processados na extrusora MixFill. Na determinação das densidades foi utilizado o equipamento apresentado na Figura 64 (balança de precisão METTLER TOLEDO AG204), que utiliza o princípio de Arquimedes.



Figura 64 Balança e dispositivo usado para calcular as densidades das amostras do material processado na MixFill

Os valores das densidades dos materiais processados na MixFill são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Densidades dos materiais processados na extrusora MixFill

Amostra	Termoendurecível	Cargas	Fracção volúmica	Massa Amostra	Massa água deslocada	Densidade
Nº	Designação	Designação	[%]	[g]	[g]	[g/cm ³]
1	Rim 900+876	Pó Pinho	20%	0,3783	-0,1996	0,6540
2	Rim 900+876	Pó Pinho	20%	0,3868	-0,2099	0,6476
3	Rim 900+876	Pó Pinho	20%	0,3966	-0,2300	0,6323
4	Rim 900+876	Cortiça ≤ 1mm	20%	0,5605	-0,3270	0,6309
5	Rim 900+876	Cortiça ≤ 1mm	20%	0,6528	-0,3259	0,6663
6	Rim 900+876	Cortiça ≤ 1mm	20%	1,5849	-0,8518	0,6498
7	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	20%	1,5455	-0,7891	0,6613
8	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	20%	2,1100	-0,8333	0,7162
9	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	20%	1,6841	-0,8411	0,6663
10	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	50%	0,4683	-0,4003	0,5386
11	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	50%	0,5822	-0,4909	0,5420
12	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	50%	0,7133	-0,6384	0,5272
13	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	66%	0,6994	-0,9938	0,4127
14	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	66%	0,7521	-1,3712	0,3539
15	Rim 900+876	Cortiça ≤ 2mm	66%	0,9248	-1,6192	0,3632
16	Rim 900+876	microesferas vidro	10%	1,2528	-1,0539	0,5424
17	Rim 900+876	microesferas vidro	10%	1,0774	-0,8826	0,5490
18	Rim 900+876	microesferas vidro	10%	0,6560	-0,5630	0,5374
19	Rim 900+876	Alumínio ≤ 3mm	10%	1,4097	-1,0060	0,5828
20	Rim 900+876	Alumínio ≤ 3mm	10%	1,0139	-0,7623	0,5701
21	Rim 900+876	Alumínio ≤ 3mm	10%	1,2883	-1,0934	0,5402

Com base nestes dados, pode-se afirmar, que os materiais têm uma homogeneidade relativamente boa já que as amostras de material foram retiradas de zonas distintas.

Nos ensaios de avaliação mecânica foi utilizado um equipamento de DMA, apresentado na Figura 65.



Figura 65 Equipamento de DMA

Os resultados dos ensaios de variação do módulo à flexão (flexão em três pontos), para os vários materiais compósitos de matriz termoendurecível com cargas, são apresentados nas Figuras 66 e 67. Na Figura 66, pode-se observar que o material compósito de matriz polimérica e cargas de alumínio, apresenta uma variação do módulo, à flexão com temperatura, superior à curva correspondente ao material utilizado como matriz. O compósito de matriz termoendurecível e microesferas ocas de vidro apresenta, inicialmente, valores inferiores aos valores de módulo à flexão do material da matriz. Para temperaturas superiores a 50 ° C, verifica-se uma inversão, o valor do módulo à flexão com o aumento da temperatura, é superior ao andamento da curva correspondente do material termoendurecível. É de notar que a adição de microesferas ocas pode-se traduzir numa importante diminuição da densidade do material compósito.

Naturalmente, com este pequeno estudo, não se pretende ter um conhecimento mais profundo destes materiais. Esse estudo será realizado posteriormente, onde se

poderá avaliar o desempenho do compósito, com diferentes frações volúmicas de cargas e, também, a influência do tamanho das partículas, para uma determinada matriz polimérica.

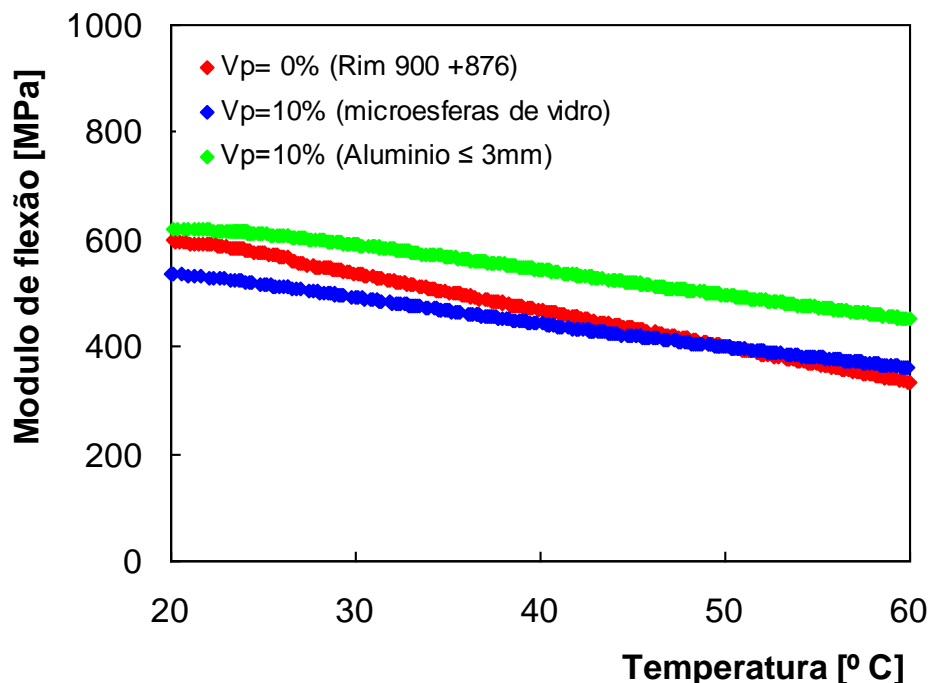


Figura 66 Variação do módulo de flexão versus temperatura (entre os 20 e os 60° C, em flexão em três pontos), para o material polimérico termoendurecível (Rim 900+876) e dois materiais compósitos de matriz termoendurecível e cargas de alumínio ($V_p=10\%$) e micro esferas ocas de vidro ($V_p=10\%$).

Na Figura 67, pode-se observar que o material compósito de matriz polimérica e cargas de cortiça ($V_p=20\%$ e partículas de cortiça ≤ 2 mm), apresenta uma variação do módulo à flexão com temperatura (20 a 60° C) superior à curva correspondente ao material utilizado como matriz.

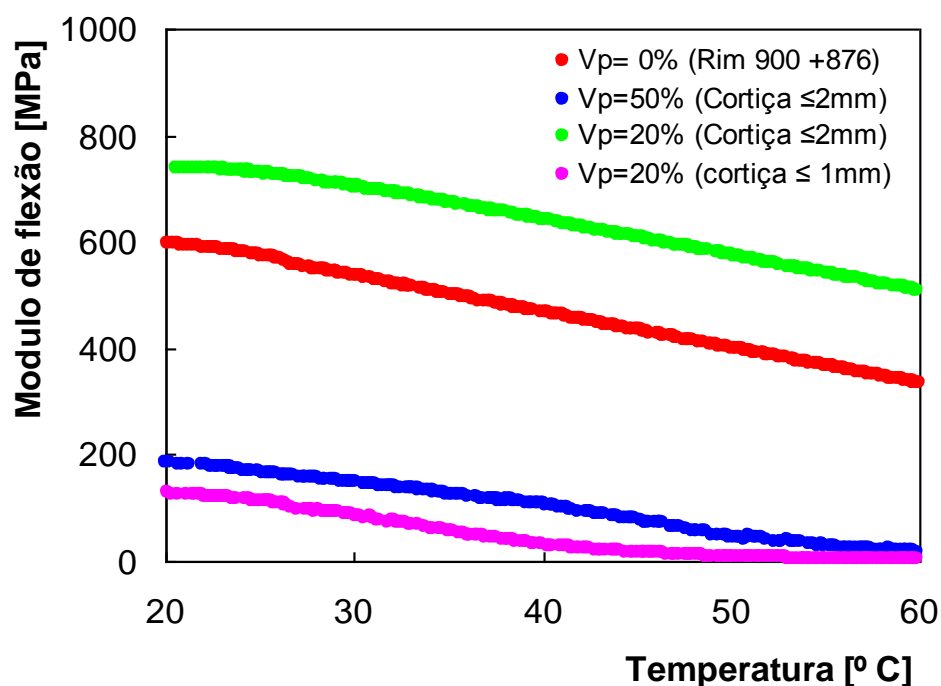


Figura 67 Variação do módulo de flexão versus temperatura (flexão em três pontos), para o material polimérico termoendurecível (Rim 900+876) e três materiais compósitos de matriz termoendurecível e cargas de cortiça Vp=20 % (partículas de cortiça $d \leq 1$ mm e $d \leq 2$ mm) e Vp=50% (partículas de cortiça $d \leq 1$ mm)

O compósito de matriz termoendurecível e cargas de cortiça (Vp=20% e partículas de cortiça ≤ 1 mm) apresenta um comportamento muito estranho. Pode ter havido problemas com o processamento deste material compósito, pois os resultados deveriam ser bastante superiores.

Capítulo 5 **Conclusões e trabalhos futuros**

5.1 Conclusões

Foi desenvolvido e fabricado um protótipo de extrusora (extrusora MixFill) para processar materiais compósitos de matriz polimérica com fracções volúmicas de cargas relativamente elevadas.

O desempenho dos vários sistemas da extrusora foram avaliados e corrigidas algumas situações anómalas.

O equipamento desenvolvido permite processar materiais termoendurecíveis com cargas resultantes de materiais termoplásticos reciclados.

O desempenho da extrusora MixFill foi avaliado positivamente, quer no processamento de materiais quer na acessibilidade para manutenção. O facto de este equipamento permitir fazer auto limpeza ou seja expulsar todo o material a processar do sistema de processamento é um aspecto positivo.

Foram processados um conjunto de materiais compósitos de matriz termoendurecível com diferentes cargas. Os materiais apresentam uma relativa boa homogeneidade, o que foi possível de analisar através de fotografias macro e da análise de densidades.

Foram, também realizados ensaios de DMA para avaliar o desempenho da extrusora MixFill. Com a realização destes ensaios pretendeu-se realizar apenas um pequeno estudo para avaliar os materiais processados.

5.2 Trabalhos Futuros

É importante criar no corpo da extrusora uma zona de desgasificação. Como é sabido as reacções de polimerização têm como alguns dos seus produtos gases, que devem ser retirados dos materiais compósitos processados, de forma a eliminar possíveis inclusões ou bolhas. Para isso, poderá ser criado no corpo da extrusora uma tomada em

vácuo para extracção de materiais passíveis de comprometer o processamento de materiais.

O alimentador de cargas deverá ser repensado. Uma ideia passa por montar o fuso transportador de forma concêntrica com a tremonha de armazenamento de material, de modo a conseguir alimentação mais apropriada às características específicas de cada material.

Como os motores eléctricos funcionam a velocidades de rotações muito baixas, pode existir problemas com o seu arrefecimento. Consequentemente, este problema deverá ser resolvido com a introdução de um sistema de ventilação forçada.

Devem ser fabricados novos fusos, com o mesmo desenho, mas com uma folga entre o fuso e as paredes do corpo cilíndrico (de 0,2 mm para 0,08mm). Deste modo, será possível melhorar a auto limpeza, pois poder-se-ão corrigir os erros de geometria cometidos na maquinação dos primeiros fusos.

Deverão, também, ser instalados mais elementos para o controlo de temperatura de forma a poder optimizar o processamento.

Referências

Antequera, P. (1991) - Los Materiales Compuestos de Fibra de Viedrio. Zaragoza: Secretariado de Publicaciones Ciudad Universitária Zaragoza ISBN. 978-84-7733-264-0

Baena, J. (2006) - Processing and kinetic studies of reactive blends of poly(vinyl chloride) and thermoplastic polyurethanes [S.I.]:[s.n]. A Dissertation Presented to The Graduate Faculty of The University of Akron.

Brown, S.B.; Orlando, C. M. (1988) - Encyclopedia of Polymer Science & Engineering: Reactive Extrusion. 2ª ed. New York: John Willey & Sons.

Brecoflex Co – Calculation Program versão3.21 [Acedido a 21 Setembro de 2009]. Disponível na internet: <http://www.brecoflex.com/?CATID=9>.

Cannon (2009) - Polyurethane Recycling: The New Cannon Filler Injection. Italy: [s.n]. [Acedido a 12 de Janeiro de 2009]. Disponível na internet: <http://www.thecannongroup.com>

Cannon Polyurethane Technology (2003) - Interwet Tecnology: Co-injection of filled and Reinforced Polyurethanes. nº105 Italy: Afros Communication. [Acedido a 15 de Janeiro de 2009]. Disponível na internet: www.cannon.com

Cannon Polyurethane Technology (2005) - Mixing Heads: High and Low Pressure Technology. nº114 Italy: Afros Communication. [Acedido a 16 de Janeiro de 2009]. Disponível na internet: http://www.afros.it/en/public/Product_Mixing_Heads/MixingHeads_0305_GB_Web.pdf

Clark, J.O.E. (1971) - Química. São Paulo: Melhoramentos.

Completo, A. (2008) - Engenharia e Desenvolvimento do Produto In: Mestrado Engenharia Mecânica, Leiria. [S.I.]: [s.n].

Davis, H. E.; Troxell, G. E.; Hauck, G. F. W. (1982) - The testing of engineering materials, 4ª ed. USA: McGraw-Hill.

Extruplás (2009) – Características Técnicas Plástico reciclado PLASCER. Acedido em Extruplás

Hennecke Polyurethane Technology (2002) – Innovations. Journal for technologies and trends on the PU Market. nº 101, p.9-16 [Acedido a 9 de Janeiro de 2009]. Disponível na internet: http://www.hennecke.com/hennecke/download/prospekte/hennecke_inno101_e.pdf

Hennecke Polyurethane Technology (2006) – Innovations. Journal for technologies and trends on the PU Market nº 106, p.14-15,18-19 [Acedido a 9 de Janeiro de 2009]. Disponível na internet:

http://www.hennecke.com/hennecke/download/prospekte/hennecke_inno106_e.pdf

Hennecke Polyurethane Technology (2008) – Innovations. Journal for technologies and trends on the PU Market nº 108, p.10-12, 21 [Acedido a 9 de Janeiro de 2009]. Disponível na internet:

http://www.hennecke.com/hennecke/download/prospekte/hennecke_inno108_e.pdf

Hennecke Polyurethane Technology (1998) - Journal Rimdomat nº 62, p.3-6 [Acedido a 9 de Janeiro de 2009]. Disponível na internet:

http://www.hennecke.com/hennecke/download/prospekte/hennecke_rimdomat.pdf

Hennecke Polyurethane Technology - topline HK: Metering machines [S.l.]: [s.n.]. [Acedido a 9 de Janeiro de 2009]. Disponível na internet:

http://www.hennecke.com/hennecke/download/prospekte/hennecke_toplinehk.pdf

Hensen, F. (1988) - Plastics extrusion technology. Munich, Vienna, New York: Hanser. ISBN 3-446-14589-3.

Ito et all (2004) - Polímeros: Análise do desenvolvimento morfológico da blenda polimérica PBT/ABS durante as etapas de mistura por extrusão e moldagem por injeção, vol.14 no.2 São Carlos: [s.n].

Janssen, P.B.M. (2007) - Reactive Extrusion Systems. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-4781-X

Kohlgruber, K. (2008) Co - Rotating Twin-Screw Extruders: Fundamentals, Technology, and Applications. Munich: Hanser. ISBN 978-1-56990-422-0.

Lyman, D; Rowland, S. (1989) - Polymers: biomaterials and medical applications. Kroschwitz, J.(eds), John Wiley and Sons, p.52-71

Macosko, C.W. - RIM: fundamentals of reaction injection molding. Munich, Vienna, New York: Hanser, 1989. ISBN 3-446-15196-6.

NP 405-1. (1994), Informação e Documentação. Referências bibliográficas: documentos impressos. Lisboa: IPQ.

NP 405-2. (1998), Informação e Documentação. Referências bibliográficas: material não livro. Lisboa: IPQ.

NP 405-3. (2000), Informação e Documentação. Referências bibliográficas: documentos não publicados. Lisboa: IPQ.

NP 405-4. (2002), Informação e Documentação. Referências bibliográficas: documentos electrónicos. Lisboa: IPQ.

NP 3680. (1989), Documentação. Descrição e referências bibliográficas: abreviatura de palavras típicas. Lisboa: IPQ.

Paul, D.R.; Newman, S. (1978) - Polymer Blends. vol.1 e vol.2. Orlando: Academic Press.

QMCWEB – A era dos plásticos: Uma síntese da nossa época. [Acedido a 18 de Outubro de 2009] Disponível na internet:

<http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/exemplar29.html>

Rauwendaal, C. (2001) - Polymer extrusion 4ª ed. Munich: Hanser. ISBN 3-446-21774-6.

Rios, M. C. (2002) - Multiple criteria optimization studies in rective in-mold coating Ohio: [s.n]. Dissertation presented in partial fulfillment of the requirements for the degree doctor of philosophy in the Graduate School of The Ohio State University.

Rook Metering Equipment and Michael Engineering - Sticky Stuff Dispenser. [S.l]: [s.n] [Acedido a 15 de Março de 2009]. Disponível na internet:

<http://www.michaelengineering.com/gg/GG.html>

Rook Metering Equipment and Michael Engineering - GOO GRINDER. [S.l]: [s.n] [Acedido a 15 de Março de 2009]. Disponível na internet:

<http://www.michaelengineering.com/gg/GG.html>

Sant'anna J.A.P. (2007) - Subsídios para seleção de materiais poliméricos termoplásticos [S.l]: [s.n]. dissertação mestrado em engenharia pela Universidade de São Paulo Brasil

Savgorodny, V. K. (1978) - Transformacion de plásticos. Trad. Luís Uralde Barcelona: Editorial Gustavo Gili. ISBN 84-252-0746-0.

Shenoy, A. V. (1999) - Rheology of Filled Polymer Systems. Great Britain: Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-412-83100-7.

Stevens, M. P. (1990) - Polymer chemistry: An introduction Basic principles. [S.l]: [s.n]. p.3-37

Ulrich, H. (1996) - Chemistry and technology of isocyanates. Chicherter, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John wiley & Sons. ISBN 1996 0-471-96371-2.

Thomson, T. (2005) - Polyurethanes as Specialty Chemicals: Principles and Applications. USA: CRC Press LLC. ISBN 0-8493-1857-2.

Tribology ABC - Power transmission: Tooth-root stress. [S.l]: [s.n] [Acedido a 20 de Outubro de 2009]. Disponível na internet: <http://www.tribology-abc.com/sub8.htm>

Utracki, L.A. (1989) - Polymer Alloys and Blends Thermodynamics and Rheology. New York: Hanser Publishers. p.356